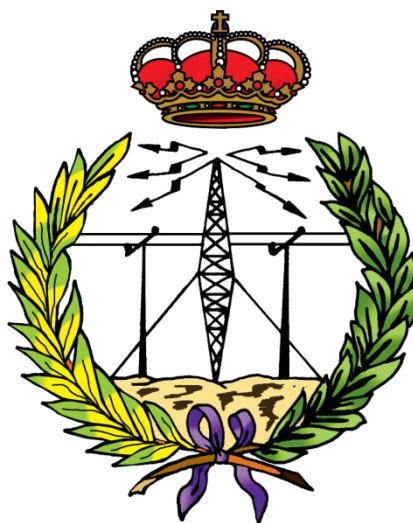


UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA
TÉCNICA DE TELECOMUNICACIÓN



PROYECTO FIN DE CARRERA

**CARACTERIZACION DE LEDs MEDIANTE EL USO Y
PROGRAMACION DE ESPECTROMETRO**

RUBÉN CEREZO TÉLLEZ

SEPTIEMBRE 2013

**PROYECTO FIN DE CARRERA
PLAN 2000**

TEMA: Estudio de espectrómetro y LEDs de diferentes frecuencias

TÍTULO: Caracterización de LEDs mediante el uso y programación de espectrómetro.

AUTOR: Rubén Cerezo Téllez

TITULACIÓN: E.U.I.T.T. especialidad en Sistemas de Telecomunicación

TUTOR: Francisco José Arqués Orobón

DEPARTAMENTO: DIAC

DIRECTOR: Vicente González Posadas

TRIBUNAL

PRESIDENTE: Miguel Ángel Freire Rubio

VOCAL: Francisco José Arqués Orobón

VOCAL SECRETARIO: Carlos Cortés Alcalá

Fecha de lectura: 25 de Septiembre de 2013

INTRODUCCIÓN

En la búsqueda de dispositivos cada vez más eficientes, de larga duración y bajo coste de mantenimiento en el mundo de la iluminación, aparecen los LEDs. Estos pequeños dispositivos van poco a poco sustituyendo a las bombillas tradicionales de incandescencia, tomando un papel cada vez más importante entre las fuentes de iluminación.

Las primeras funciones prácticas que tuvieron estos LEDs fueron como indicadores, y sus primeros usos fueron en pantallas de calculadoras, electrodomésticos, etcétera, y más adelante, con el desarrollo de nuevos materiales, se empezaron a utilizar como dispositivos de iluminación.

Ha sido en estos últimos años cuando se ha producido un salto cuantitativo gracias a la aparición de los POWER LED (LEDs de potencia) o de alto brillo, que son los que han permitido ampliar el uso de estos dispositivos como fuentes de iluminación en, por ejemplo, hogares, alumbrado público, e incluso llegando a sustituir los faros halógenos de vehículos por iluminación LED en algunos modelos. Es por ello que mientras su potencia lumínica va aumentando, su rango de utilización también lo hace.

Para caracterizar estas fuentes lumínicas y otras a las que se les pueden dar diferentes usos, se desarrolla este proyecto mediante el análisis de su espectro. Para ello, además, se hará un análisis del resto de instrumentación necesaria que forma parte del proyecto. Este análisis abarca el estudio del propio espectrómetro tanto a nivel de hardware como de software, que modificaremos según los intereses del proyecto. También se estudiará la fibra óptica y el driver para controlar los dispositivos LEDs de potencia, así como los propios LEDs. Para ello se medirán las características de estos LEDs y se compararán con las facilitadas por el fabricante.

ABSTRACT

Searching for more efficient, long lasting and low-maintenance devices in lighting world, LEDs appear. These small devices are gradually replacing traditional incandescent bulbs. LEDs are taking an increasingly important role between the light sources.

At the beginning they were only used as indicators and their first use were in screens calculators, appliances, etc., and later, with the development of new materials, were progressively used as lighting devices.

Nowadays a great development has happened in LED lighting with the apparition of the POWER LED or high bright. Power LEDs are allowed to extend the use of these devices as lighting sources for example for homes, street lighting, and even coming to replace halogen headlights LED lighting in vehicles of some models. That's the reason the more their lighting power increases the more their use increases too.

The aim of this project is to characterize these light sources and others that can be given different uses by analyzing its spectrum. Moreover, necessary instruments will also be analysed. This study involves both hardware and software spectrometer analysis itself by modifying its software according to the interests of the project. Furthermore, optical fiber and the driver to control LED power devices will be studied by measuring LEDs characteristics and comparing with those provided by the manufacturer.

INDICE DE CONTENIDOS

1.- OBJETIVOS	- 17 -
2.- ESTADO DEL ARTE	- 19 -
2.1.- FUENTES DE LUZ LED	- 19 -
2.2.- COMPOSICIÓN Y FUNCIONAMIENTO	- 20 -
2.2.1.- EFICIENCIA	- 26 -
2.2.2.- ESTRUCTURA	- 28 -
2.2.3.- OPTICAS Y MONTAJES	- 30 -
2.3.- LED INFRARROJO	- 35 -
2.4.- ESPECTRO VISIBLE	- 35 -
2.4.1.- LED ROJO	- 39 -
2.4.2.- LED AMARILLO Y VERDE	- 40 -
2.4.3.- LED AZUL	- 40 -
2.4.4.- LED BLANCO	- 40 -
2.4.5.- LED TRICOLOR y BICOLOR	- 45 -
2.5.- UV	- 46 -
2.6.- POWER LED	- 46 -
2.6.- LASER	- 49 -
3.- FIBRA ÓPTICA	- 55 -
4.- ESPECTRÓMETRO	- 57 -
4.1.- SOFTWARE DEL FABRICANTE	- 58 -
5.- ARDUINO	- 61 -
5.1.- ARDUINO UNO REV3	- 62 -
5.2.- ADAFRUIT SHIELD	- 65 -
6.- MOTOR PASO A PASO (PaP)	- 69 -
7.- IMPLEMENTACION SOFTWARE	- 71 -
7.1.- ASPECTO Y FUNCIONAMIENTO	- 71 -
7.2.- CÓDIGO	- 74 -
7.2.1.- LIBRERIAS	- 74 -
7.2.2.- INFORMACION PERIFERICOS	- 77 -
7.2.3.- TEMPERATURA	- 79 -

7.2.4.- FILTRADO.....	- 79 -
7.2.5.- CALIBRACION	- 82 -
7.2.6.- CONEXION ARDUINO	- 83 -
7.2.7.- NORMALIZACION.....	- 85 -
7.2.8.- RELACION SEÑAL RUIDO.....	- 86 -
7.2.9.- INICIO / FIN DE MEDIDAS	- 89 -
7.2.10.- OPEN FILE / SAVE AS.....	- 92 -
8.- DESARROLLO PRÁCTICO Y MEDIDAS.....	- 97 -
8.1- LEDs ADQUIRIDOS	- 97 -
8.1.1.- SOPORTES	- 100 -
8.2.- DRIVER	- 103 -
8.3.- MECANIZADO.....	- 105 -
8.4.- MEDIDAS	- 109 -
8.4.1.- EQUIPOS.....	- 109 -
8.4.2.- PWM.....	- 110 -
8.4.3.- RESULTADOS	- 112 -
8.5.- COMPARATIVA RESULTADOS CON DATOS FABRICANTE.....	- 117 -
9.- PRESUPUESTO.....	- 123 -
10.- CONCLUSIONES.....	- 125 -
11.- LINEAS FUTURAS DE TRABAJO.	- 127 -
BIBLIOGRAFIA	- 129 -

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.....	- 19 -
Figura 2.....	- 20 -
Figura 3.....	- 21 -
Figura 4.....	- 21 -
Figura 5.....	- 22 -
Figura 6.....	- 22 -
Figura 7.....	- 23 -
Figura 8.....	- 24 -
Figura 9.....	- 25 -
Figura 10.....	- 25 -
Figura 11.....	- 26 -
Figura 12.....	- 26 -
Figura 13.....	- 27 -
Figura 14.....	- 28 -
Figura 15.....	- 29 -
Figura 16.....	- 30 -
Figura 17.....	- 30 -
Figura 18.....	- 31 -
Figura 19.....	- 31 -
Figura 20.....	- 32 -
Figura 21.....	- 33 -
Figura 22.....	- 34 -
Figura 23.....	- 34 -
Figura 24.....	- 36 -
Figura 25.....	- 37 -
Figura 26.....	- 39 -

Figura 27.....	- 41 -
Figura 28.....	- 43 -
Figura 29.....	- 43 -
Figura 30.....	- 44 -
Figura 31.....	- 45 -
Figura 32.....	- 45 -
Figura 33.....	- 47 -
Figura 34.....	- 48 -
Figura 35.....	- 48 -
Figura 36.....	- 49 -
Figura 37.....	- 50 -
Figura 38.....	- 51 -
Figura 39.....	- 53 -
Figura 40.....	- 55 -
Figura 41.....	- 57 -
Figura 42.....	- 58 -
Figura 43.....	- 59 -
Figura 44.....	- 61 -
Figura 45.....	- 62 -
Figura 46.....	- 63 -
Figura 47.....	- 63 -
Figura 48.....	- 64 -
Figura 49.....	- 65 -
Figura 50.....	- 66 -
Figura 51.....	- 66 -
Figura 52.....	- 67 -
Figura 53.....	- 68 -
Figura 54.....	- 69 -

Figura 55.....	- 70 -
Figura 56.....	- 71 -
Figura 57.....	- 72 -
Figura 58.....	- 73 -
Figura 59.....	- 74 -
Figura 60.....	- 77 -
Figura 61.....	- 78 -
Figura 62.....	- 78 -
Figura 63.....	- 80 -
Figura 64.....	- 81 -
Figura 65.....	- 81 -
Figura 66.....	- 82 -
Figura 67.....	- 83 -
Figura 68.....	- 84 -
Figura 69.....	- 84 -
Figura 70.....	- 84 -
Figura 71.....	- 85 -
Figura 72.....	- 85 -
Figura 73.....	- 86 -
Figura 74.....	- 87 -
Figura 75.....	- 87 -
Figura 76.....	- 88 -
Figura 77.....	- 88 -
Figura 78.....	- 88 -
Figura 79.....	- 90 -
Figura 80.....	- 93 -
Figura 81.....	- 94 -
Figura 82.....	- 95 -

Figura 83.....	- 98 -
Figura 84.....	- 98 -
Figura 85.....	- 99 -
Figura 86.....	- 101 -
Figura 87.....	- 101 -
Figura 88.....	- 102 -
Figura 89.....	- 102 -
Figura 90.....	- 103 -
Figura 91.....	- 104 -
Figura 92.....	- 105 -
Figura 93.....	- 105 -
Figura 94.....	- 106 -
Figura 95.....	- 106 -
Figura 96.....	- 107 -
Figura 97.....	- 107 -
Figura 98.....	- 108 -
Figura 99.....	- 108 -
Figura 100.....	- 108 -
Figura 101.....	- 109 -
Figura 102.....	- 109 -
Figura 103.....	- 110 -
Figura 104.....	- 110 -
Figura 105.....	- 111 -
Figura 106.....	- 112 -
Figura 107.....	- 113 -
Figura 108.....	- 114 -
Figura 109.....	- 115 -
Figura 110.....	- 116 -

Figura 111.....	- 117 -
Figura 112.....	- 118 -
Figura 113.....	- 118 -
Figura 114.....	- 118 -
Figura 115.....	- 119 -
Figura 116.....	- 120 -
Figura 117.....	- 120 -
Figura 118.....	- 121 -
Figura 119.....	- 127 -
Figura 120.....	- 127 -

INDICE DE TABLAS

Tabla I.....	- 38 -
Tabla II	- 42 -
Tabla III.....	- 57 -
Tabla IV.....	- 58 -
Tabla V	- 100 -
Tabla VI.....	- 100 -

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación I.....	- 38 -
Ecuación II.....	- 38 -
Ecuación III	- 38 -
Ecuación IV	- 103 -



1.- OBJETIVOS

Este proyecto fin de carrera tiene como objetivo la realización del análisis y caracterización espectral de diodos LED de diferentes frecuencias y potencias. Para ello se utilizará un espectrómetro adquirido para este fin, por lo que se hace necesario también el conocimiento de su funcionamiento, dado que pueden realizarse tareas de programación del mismo mediante C o MatLab, a fin de optimizar su uso.

Para la elección de los LEDs, se estudiarán los diferentes tipos que hay en el mercado, por lo que se presenta una distinción de éstos en base a sus características.

Actualmente los LEDs de alta potencia abren nuevos caminos en la utilización de esta tecnología, sustituyendo a las fuentes de luz convencionales. Sin embargo, para su uso son necesarios controladores específicos, por lo que en este proyecto se incluye un análisis de estos, tanto a nivel teórico como práctico.

Por último se marcan posibles mejoras del software desarrollado y del uso de estos dispositivos.

2.- ESTADO DEL ARTE

2.1.- FUENTES DE LUZ LED

Los LEDs, de las siglas en inglés Light-Emitting Diode o diodo emisor de luz, se descubrieron accidentalmente a principios del siglo pasado por Henry Joseph Round (1881-1966) pero no fue hasta 1907 cuando se publicaron los primeros resultados obtenidos. En la Figura 1 se indica que este primer LED se trataba de un diodo Schottky, en lugar de un diodo con una unión convencional p-n, que es la utilizada por los diodos normales. Fue la primera observación de electroluminiscencia de un LED y estaba formado por carburo de silicio (SiC) y un material abrasivo [1].

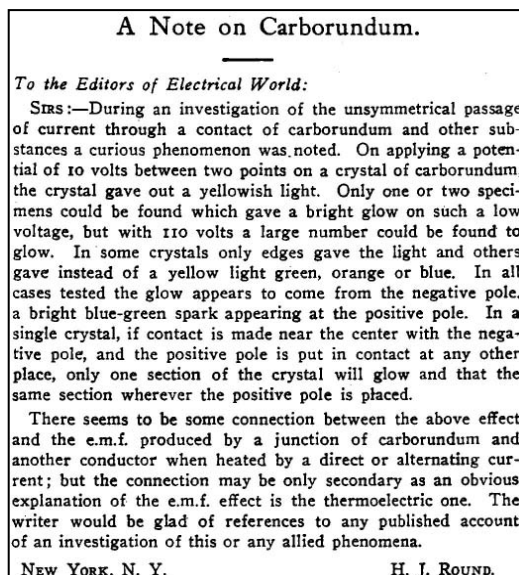


Figura 1

Los diodos Schottky son generalmente dispositivos semiconductores portadores mayoritarios. Sin embargo, se pueden crear portadores minoritarios ya sea bajo fuertes condiciones de polarización directa, o por multiplicación por avalancha bajo condiciones de polarización inversa.

El mecanismo de emisión de luz de un diodo Schottky polarizado se muestra en la Figura 2 donde se muestra el diagrama de bandas de la unión metal-semiconductor bajo (A) equilibrio, (B) polarización directa moderada, y (C) condiciones fuertes de polarización directa.

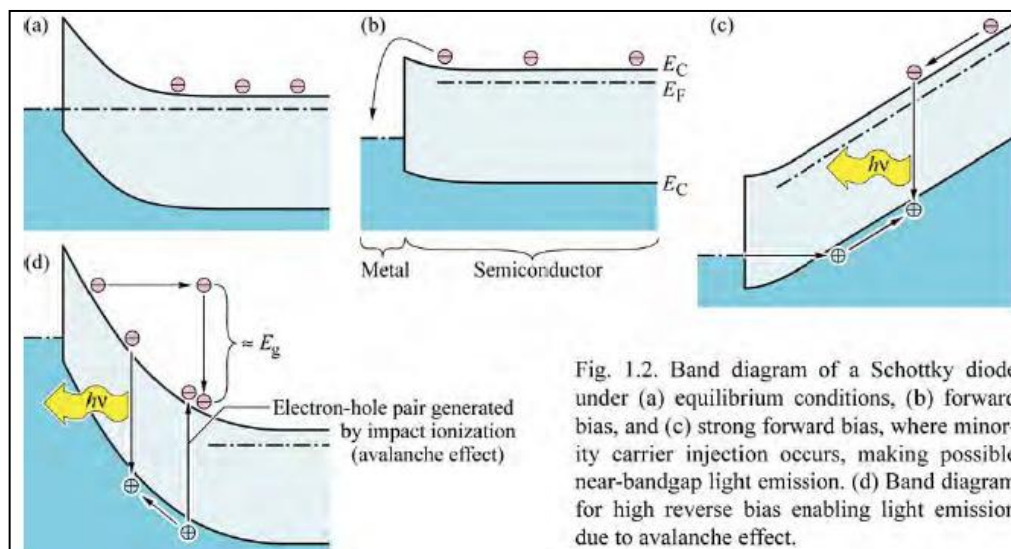


Figura 2

Esta composición estaba poco controlada, y el proceso de emisión no se entendía completamente en aquel entonces. Al cabo del tiempo y tras haber caído en el olvido, en la década de 1920 los LEDs se redescubrieron, y más adelante lo hicieron de nuevo en la década de 1950. En los 60, varios grupos intentaron demostrar el funcionamiento de las capas semiconductoras. A partir de este momento, en 1962, Nick Holonyak pasa a ser el nombrado descubridor del LED debido a la creación de uno de estos diodos en el espectro visible. El primer LED viable y parecido a como lo conocemos actualmente, fue un subproducto de la búsqueda que realizaron estos grupos.

Ya en la década de los 90, Shuji Nakamura abre un nuevo horizonte para esta tecnología al descubrir una forma económica de conseguir el color primario que faltaba hasta el momento, el azul.

2.2.- COMPOSICIÓN Y FUNCIONAMIENTO

Los LEDs (Light Emitting-Diode) como indican su nombre, son diodos de material semiconductor que al polarizar su unión p-n directamente, circula por ella una corriente eléctrica produciendo el fenómeno de emisión de luz. A diferencia de la fuentes luminosas convencionales (bombillas de incandescencia p. e.), no tiene filamentos, ni gases, ni cualquier otro elemento que esté sometido al desgaste, por lo que su vida útil es mucho mayor.

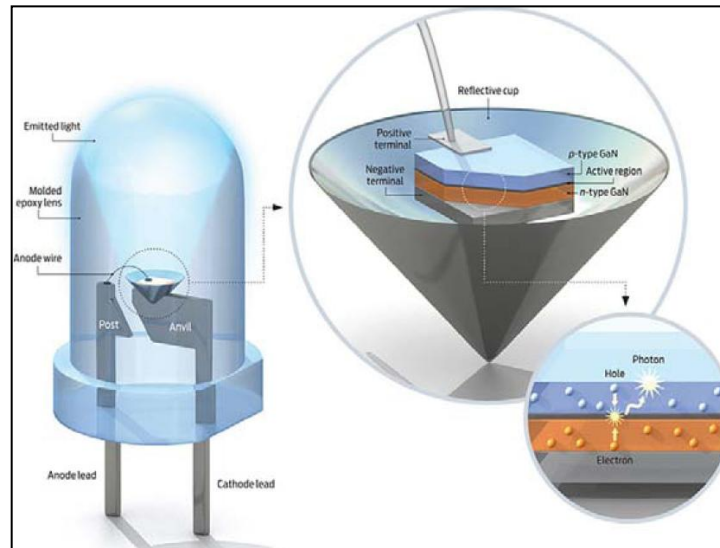


Figura 3

El proceso de emisión se basa en la teoría de bandas, por lo que al excitar los electrones, estos son capaces de saltar de la banda de conducción (BC) a la banda de valencia (BV) atravesando la banda de energía que separa estas dos regiones llamada gap, bandgap o banda prohibida, emitiendo frecuentemente un fotón.

La emisión de luz de los LEDs se caracteriza por ser espontánea, es decir, es incoherente. Cada uno de los materiales semiconductores que los componen tienen unas determinadas características, es por esto que la longitud de onda de la luz emitida variará dependiendo de los materiales con los que sea construido. De este modo, por ejemplo, un semiconductor de fosfuro de Galio (GaP) emitirá en la zona roja del espectro, mientras que uno de nitruro de Galio e Indio (InGaN) emitirá en la zona verde y azul.

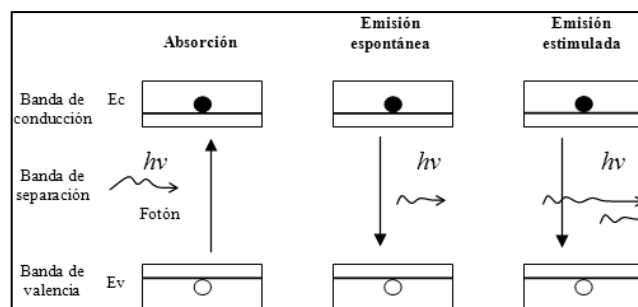


Figura 4

Otra de las características de su luz emitida es que tiene gran anchura espectral, es decir, que emite con diferentes longitudes de onda lo que les convierte en emisores policromáticos. Esta anchura espectral es relativa, ya que comparados con otras fuentes de luz pueden llegar a definirse como monocromáticos.



Para entender por qué se tratan de dispositivos semiconductores, hay que atender al gap o banda prohibida del material del que están compuestos, pudiendo clasificarse los dispositivos en tres grandes grupos según su conductividad:

- Conductores: Tienen la BC y la BV superpuestas o sin separación entre ambas bandas, siendo estas contiguas. También puede darse que tengan cierta separación, pero será mínima, lo que permite a los electrones moverse libremente en todos los casos.
- Semiconductores: La separación entre ambas bandas es suficiente como para que los electrones no pasen de una banda a otra libremente, pero si permite el salto de algunos electrones al añadir impurezas.
- Aislante: Los electrones no pueden pasar de la BC a la banda de BV ya que el gap entre ellas es demasiado grande, por lo que no conducirán corriente eléctrica.

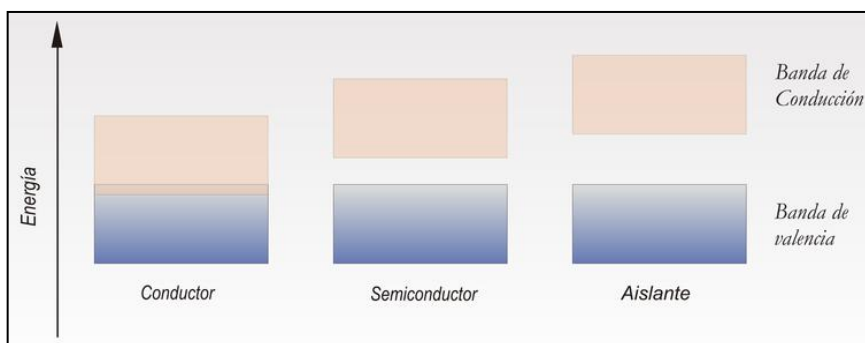


Figura 5

Los LEDs, como se comentaba en su descripción, están enmarcados dentro del grupo de los semiconductores. Dependiendo de la separación entre la banda de conducción y la de valencia, que se caracteriza por el material semiconductor empleado, el color variará desde el ultravioleta, pasando por el espectro visible y hasta el infrarrojo, siendo estos últimos denominados IRED (Infra-Red Emitting Diode).

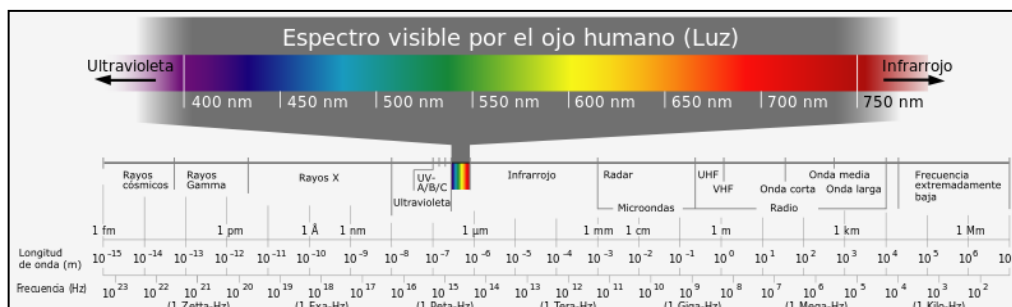


Figura 6

Alguno de los materiales que componen el semiconductor pueden ser originalmente aislantes, como es el caso del Silicio (Si). Sin embargo forma parte en la composición de muchos tipos de LEDs gracias a un proceso denominado dopaje. En este proceso se añaden pequeñas cantidades de otros elementos de la tabla periódica, para conseguir en este caso particular que funcione como un semiconductor y exista emisión de luz. Este dopaje puede ser de dos tipos, dopaje tipo N (al añadir un dopante con un electrón “sobrante” en su órbita) y dopaje tipo P (al añadir un dopante con un electrón de menos en su órbita). El nitruro de galio (GaN) dopado con magnesio (Mg) son otros dos de los elementos famosos usados en diodos laser y LEDs.

Para entender mejor el proceso de emisión se explicará cómo se comportan las partículas de los átomos. El LED emitirá fotones si los electrones y huecos están en la misma región, por lo que pueden recombinarse. Cuando un electrón de la zona N se recombina con un hueco de la zona P, este “cae” de un nivel energético superior a otro inferior más estable, de manera que esa pérdida de energía se puede manifestar en forma de fotón desprendido con una dirección, amplitud, y fase aleatoria, sin necesidad de que haya otros fotones presentes que aumenten la velocidad de recombinación, como ocurre con la emisión estimulada dentro de una cavidad. Para que exista emisión, el LED tiene que estar polarizado directamente, de modo que la corriente fluya a través del diodo y de su unión p-n, como se comentaba anteriormente. En estas condiciones los huecos se inyectan desde la zona P a la zona N, mientras que los electrones se inyectan desde la zona N a la zona P.

En el caso de que se polarice el LED inversamente, no circulará corriente por él al igual que ocurre con el resto de diodos, y por tanto no se producirá la luminiscencia.

En la Figura 7 se muestra un LED polarizado directamente de modo que las recombinaciones producen la emisión de fotones como se ha explicado con anterioridad.

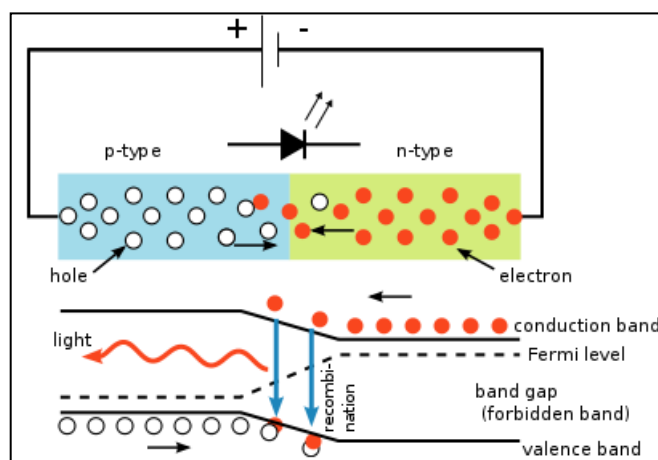


Figura 7

El electrón que se encuentra en la banda de conducción pasa a la de valencia, perdiendo energía en forma de fotones en cada transición. La energía de este fotón depende principalmente de la diferencia de energía entre la banda de conducción y la de valencia, siendo esta energía $E_g = h\nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}$.

A diferencia de los metales que tienen un número de portadores constante, en los semiconductores crecen a medida que aumenta la temperatura como consecuencia del crecimiento de la agitación térmica, que produce que se rompan los enlaces atómicos creando pares de electrón-hueco.

Pero no siempre que se recombina un electrón de un nivel energético superior con un hueco de un nivel energético inferior se emite un fotón. Si la recombinación emite luz, se conoce como recombinación radiante, mientras que si el producto de la recombinación es un fonón, se conoce como recombinación no radiante, que a consecuencia de las vibraciones producidas genera calor en el dispositivo.

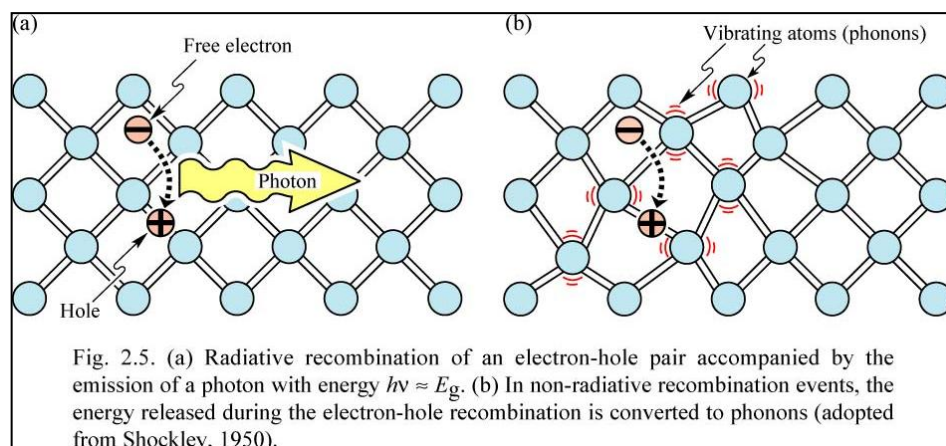


Figura 8

Es frecuente que se produzcan recombinaciones radiantes en los semiconductores de gap directo o banda prohibida directa (p.ej. arseniuro de galio, nitruro de galio...), mientras que en los de gap indirecto o banda prohibida indirecta (p.eje. silicio, germanio...) es menos probable que esto suceda. En estos últimos la energía emitida en la recombinación es mayoritariamente en forma de calor (fonones) [1]

Como se muestra en la Figura 9, los semiconductores de gap directo son aquellos en los que el mínimo de la banda de conducción y el máximo de la banda de valencia se corresponden al mismo K (mismo momentum). Se diferencian de los de gap indirecto en que en estos no se corresponde el mismo momentum para el mínimo y el máximo de la banda de conducción y valencia respectivamente. Para que en estos últimos se produzca la transición es necesaria la

participación de una tercera partícula (cuantos de vibración o fonones) que aporte la diferencia de energía necesaria entre el estado inicial y el estado final [2].

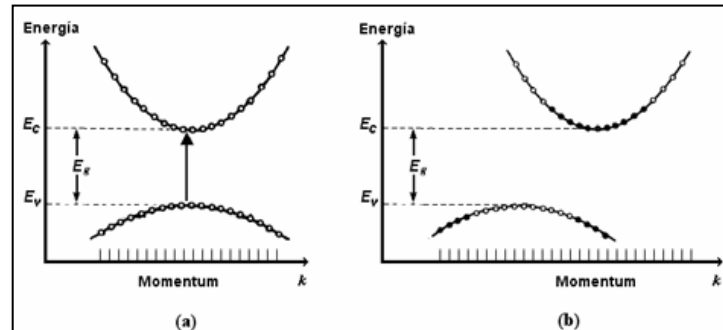


Figura 9

De este modo, dependiendo de si el semiconductor es de gap directo o indirecto, será utilizado con una funcionalidad u otra. Los de gap directo al ser unos emisores eficientes de fotones, se utilizan para señalización, iluminación, y a grandes rasgos donde se requiere una gran cantidad de fotones emitidos. Los de gap indirecto son usados como foto-detectores aunque también se encuentran de gap directo con esta misma funcionalidad.

Una vez conocidas las propiedades que caracterizaban a estos diodos, la combinación de materiales para obtenerlos no fue fácil. Los esfuerzos a lo largo de la historia se han concentrado en dos objetivos bien definidos. El primero de ellos fue conseguir todos los colores del espectro visible y el segundo aumentar la eficiencia de los semiconductores en la medida de lo posible. Pero el primer objetivo no se alcanzó hasta finales del siglo XX, cuando se inventó el LED azul y se consiguieron por tanto los 3 colores primarios. De este modo se abría el abanico de posibilidades para esta tecnología. En cuanto a la eficiencia, año tras año ha ido aumentando, aunque ya desde sus orígenes era una batalla prácticamente ganada a la iluminación convencional. En esta gráfica se resume el progreso histórico del desarrollo de la eficiencia lumínica de diferentes LEDs de espectro visible.

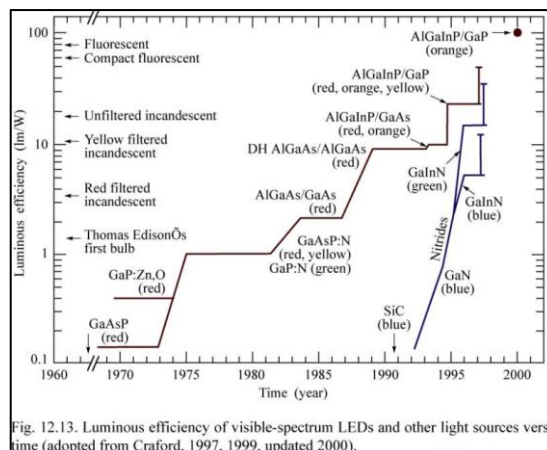


Fig. 12.13. Luminous efficiency of visible-spectrum LEDs and other light sources versus time (adopted from Craford, 1997, 1999, updated 2000).

Figura 10



2.2.1.- EFICIENCIA

Comparando la eficiencia general (lúmenes por watio) de los LEDs con la de las fuentes de luz convencionales, se puede observar que la evolución en los diodos ha crecido muchísimo más rápido y en menor tiempo que el resto de tecnologías [3].

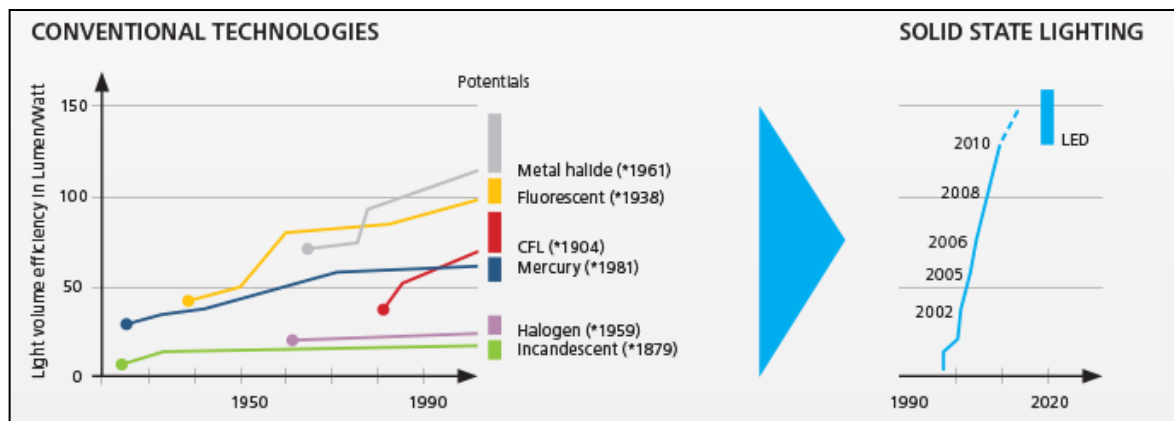


Figura 11

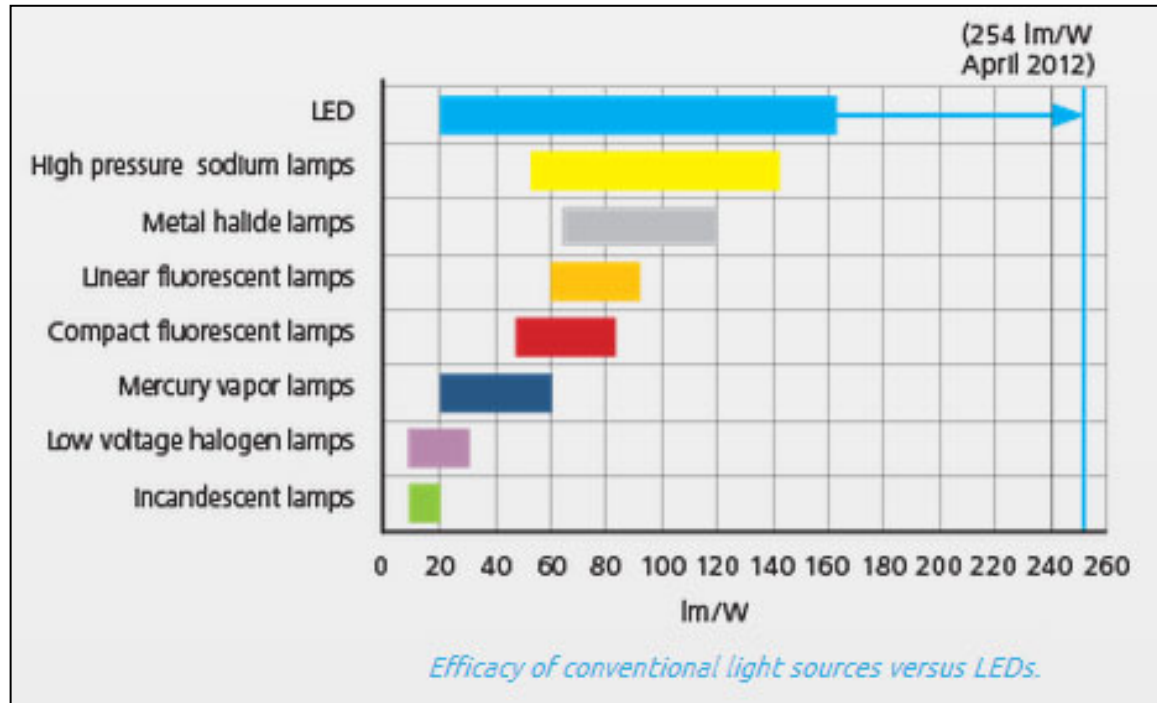


Figura 12

Este desarrollo histórico hizo que un científico de Agilent Technologies, el Dr. Ronald Haitz, enunciara una predicción conocida como la Ley de Haitz. Esta ley determina que cada 10 años el coste por lumen de los LEDs disminuye 10 veces mientras que la intensidad luminosa radiada por un LED se incrementará en un factor de 20, siempre referenciado a cada color o longitud de onda.

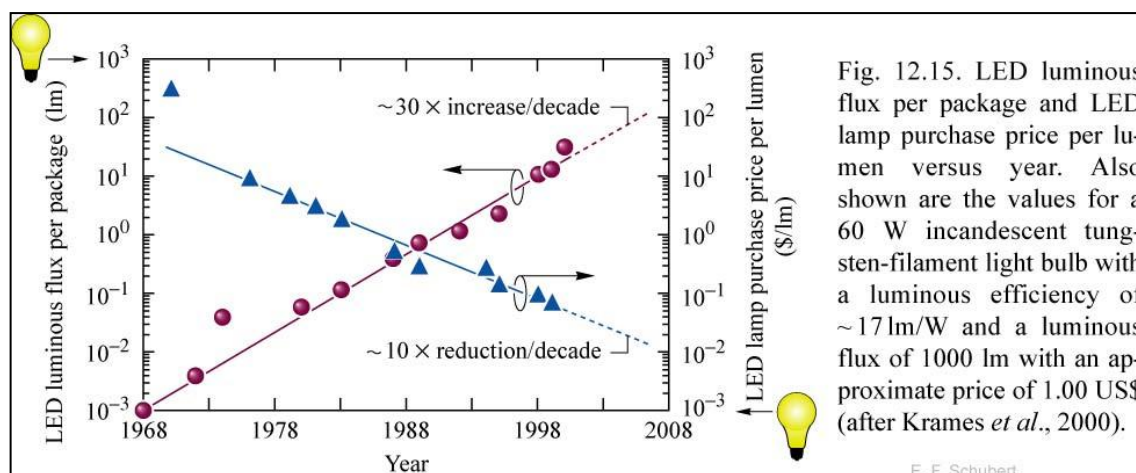


Figura 13

Esto se traduce directamente en un ahorro tanto en consumo, como en mantenimiento al no tener que estar cambiando los dispositivos de luz con tanta frecuencia. Este ahorro se puede observar en la Figura 14, donde se ha tomado como referencia un LED de 5W y distintas bombillas y lámparas que consiguen la misma iluminación [4]. Es frecuente ver comparativas de luminosidad de diodos frente a bombillas de incandescencia donde se toma únicamente como referencia el consumo, y no el consumo y luminosidad como en este caso. Haciéndolo así no se está teniendo en cuenta que para dos diodos LED con el mismo consumo, dependiendo de su eficiencia sus valores de luminosidad pueden ser muy dispares. Lo mismo sucede en el mercado actual, donde muchos fabricantes venden sus productos de iluminación LED únicamente indicando su consumo.

El aumento en la eficiencia se debe a la mejora de los procesos productivos y el aumento de la radiación extraída de dentro del LED, ya que una parte se absorbe internamente. Y es que además de los componentes, el diseño del LED también es importante para que al usarlo como emisor la probabilidad de que se emita un fotón sea elevada. Para ello la zona P se sitúa en la parte superior para emitir los fotones, en lugar de en la parte inferior donde se encuentra la zona N, ya que si fuera al revés habría una alta posibilidad de que los fotones fueran absorbidos antes de emerger. Por consecuencia, la inyección de electrones es preferible que sea mucho mayor en la zona P que la inyección de huecos en la zona N para que la corriente pase a estar dominada por los electrones.



LED de 5 W	Bombilla incandescente	Lámpara bajo consumo	Lámpara halógena	LED	Condiciones de la comparativa
Consumo real con idéntica eficiencia energética	25 W	9 W	20 W	5 W	1. Cálculo efectuado sobre un total de 36.500 horas en 10 años, calculando una utilización diaria de las lámparas de 10 horas.
Consumo a la hora (kWh)	0,025	0,009	0,020	0,005	
Consumo total durante 1 año (kW)	91,25	32,85	73,00	18,25	
Importe consumo eléctrico 1 año	13,69 €	4,93 €	10,95 €	2,74 €	
Importe consumo eléctrico 10 años	136,88 €	49,28 €	109,50 €	27,38 €	
Vida de la lámpara	1.000 horas	3.000 horas	3.000 horas	Alrededor de 40.000 horas	2. Importe del Kilowatio/hora calculado a razón de 0,15€.
Sustituciones de lámparas en 10 años (número de veces)	36	12	12	Sin costes	
Precio unitario	0,60 €	3,00 €	2,40 €		
Coste de mantenimiento	108,00 €	180,00 €	144,00 €		
Cálculo aproximado del importe de costes a los 10 años	Consumos + Coste lámparas sustituidas + Coste de sustituciones de lámparas				4.El precio por unidad es sólo un precio de referencia.
	244,88 €	229,28 €	253,50 €	27,38 €	
Ahorro sustituyendo la lámpara por LED	217,50 €	201,90 €	226,13 €		

Figura 14

2.2.2.- ESTRUCTURA

Otro aspecto importante en el rendimiento de los LEDs es su temperatura. El LED, como el resto de lámparas, bombillas, y en general cualquier dispositivo de iluminación tradicional, produce calor. Sin embargo este calor no es irradiado junto con el haz de luz (a excepción de los LED IR) ,ya que al ser un dispositivo relativamente monocromático no emite en el infrarrojo. Este calor se genera por su parte trasera y se disipa por contacto físico (conducción). Generalmente por la parte delantera no generan calor debido a que las recombinaciones no se producen en la superficie (LEDs de superficie plana). Para evitar esas recombinaciones en la superficie no deseadas, esta tiene que estar alejada de las regiones donde se encuentran los electrones y los huecos, es decir fuera del alcance de la región activa. Los diodos LED llamados mesa-etched exponen la región activa al aire, por lo que generalmente tienen unas eficiencias internas bajas a causa de las recombinaciones en la superficie. Además estas recombinaciones provocan una reducción del tiempo de vida de los LEDs, ya que generan calor en la superficie del semiconductor provocando defectos en su estructura que además reducen su eficiencia .

Cuanto mayor sea la potencia del LED, más calor producirá y por consiguiente mayor tendrá que ser el disipador, que generalmente suele ser de aluminio. La importancia de la disipación

del calor, y como éste afecta al tiempo de vida de los LEDs, se muestra en la Figura 15 donde se muestra la intensidad radiante de dos mesa-etched LEDs frente a otros dos LEDs planos [5]

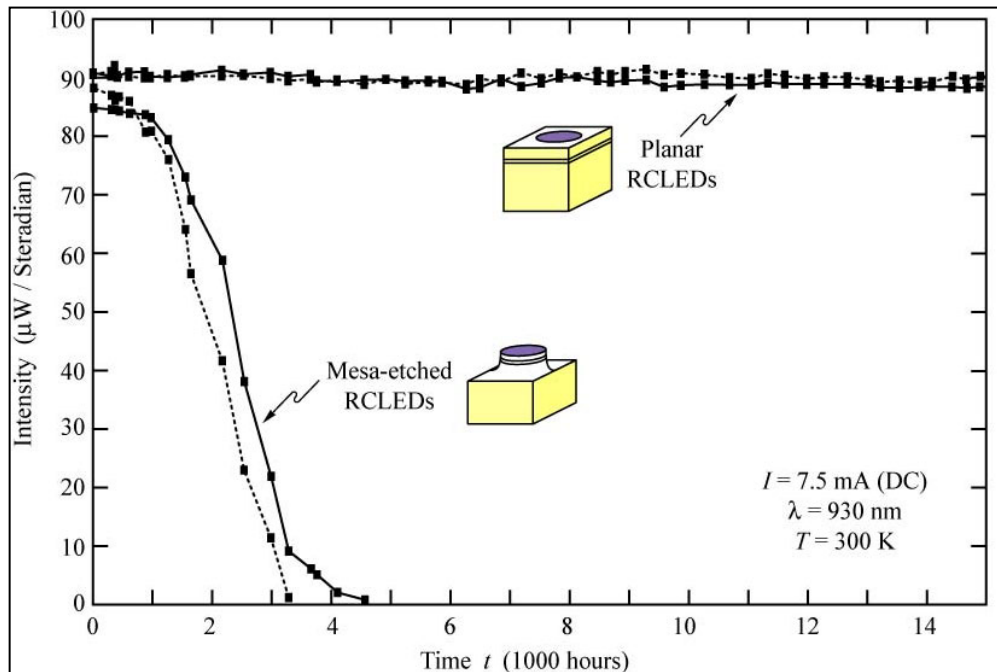


Figura 15

En el plano, las recombinaciones electrón-hueco se producen bajo la parte superior del contacto metálico lejos de la superficie del LED, consiguiendo que la disipación de calor sea mayor y manteniendo todo el LED a una temperatura inferior consiguiendo que este calor no afecte a la estructura y manteniendo una intensidad radiante más o menos constante durante mucho tiempo.

Algunos de los problemas que surgen en los LEDs de homounión se resuelven con los LEDs de heterounión (estratificados normalmente en dos capas). Este tipo de semiconductores, a diferencia de los de homounión, inyectan los electrones de la zona n y los huecos de la zona p a una zona con menor anchura de gap. Es decir, pasan de una zona prohibida de mayor anchura a un “pozo” (región activa) donde quedan retenidas las cargas sin poder salir y donde la anchura de la zona prohibida es menor. Además, de este modo los fotones que emite el diodo no se absorben en las regiones superior o inferior ya que ese fotón generado tiene una energía menor que la anchura del gap de las regiones p o n.

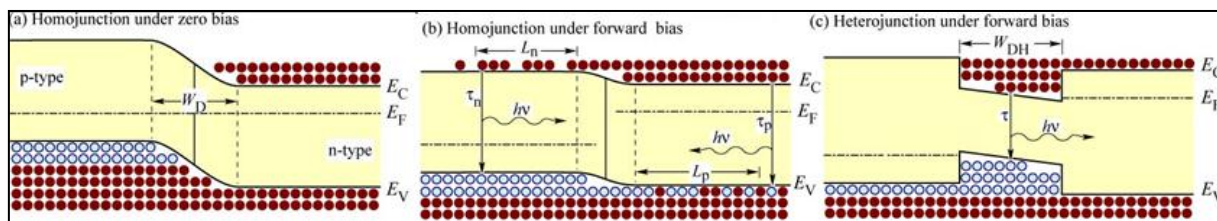


Figura 16

Otra de las características de los LEDs de heterounión es que son más direccionales al mantener las recombinaciones en una zona más estrecha, por lo que su uso como fuente luminosa para sistemas de comunicación con fibra óptica es mejor opción.

Tan importante es su estructura interna como los tipos de encapsulados. Debido a esto, dentro del mismo tipo de LED se pueden usar diferentes ópticas, consiguiendo de este modo focalizar el haz en un punto o dispersarlo, dependiendo de la funcionalidad que vaya a tener. De esta manera, por ejemplo, las luces de lectura de los vehículos tienden a dispersar el haz mientras que los utilizados en los testigos o pilotos de cualquier electrodoméstico tienen un haz poco disperso.

2.2.3.- OPTICAS Y MONTAJES

Haciendo referencia a su encapsulado y tipo de ópticas podemos encontrar gran variedad de LEDs, consiguiendo multitud de combinaciones que facilitan un gran abanico para elegir el más apropiado según el uso que se le vaya a dar.

El LED estándar se compone por un encapsulado de epoxi, acabado en forma semiesférica por norma general, que hace las veces de lente. Esta cápsula se puede encontrar de diferentes tamaños (3mm, 5mm, etc) y formas, protegiendo uno o varios chips en el mismo LED.

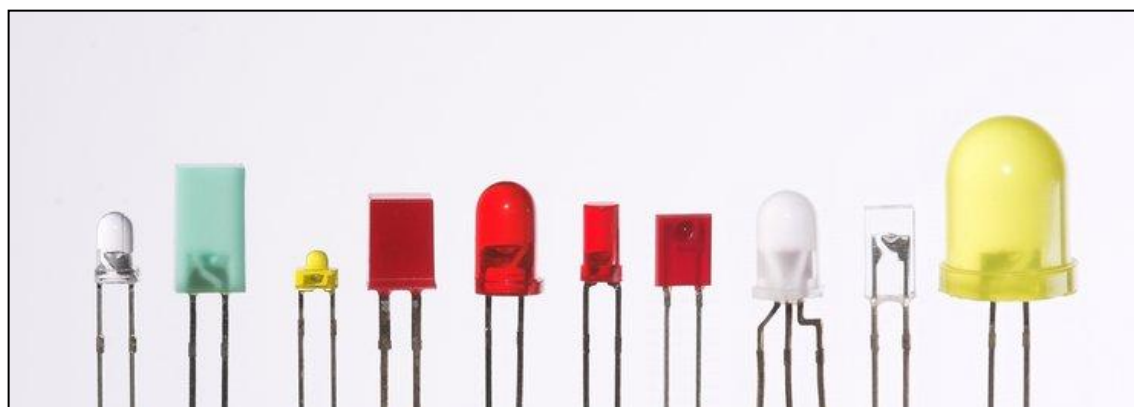


Figura 17

La dispersión del haz en función de su construcción puede apreciarse en las siguientes imágenes. Además de la forma del encapsulado, su acabado también es fundamental apareciendo desde totalmente cristalinos que permiten a los fotones emitirse, como mates o rallados que hacen que los fotones no salgan a la superficie.

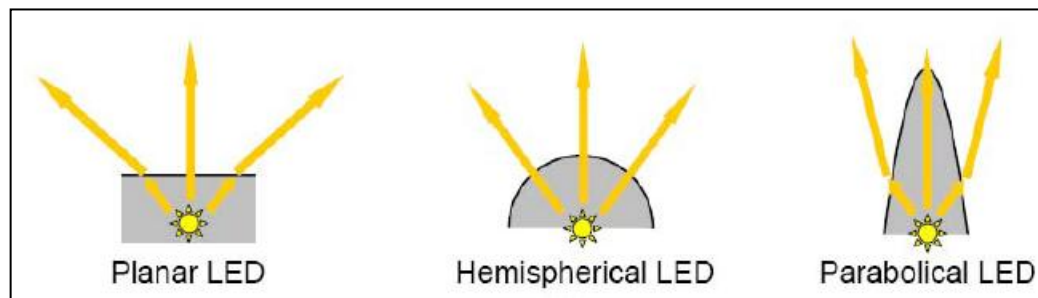


Figura 18

Estas lentes consiguen que el diagrama de emisión del diodo varíe considerablemente, pudiendo dar diferentes usos a un mismo tipo sin tener que variar los procesos de fabricación del propio diodo.

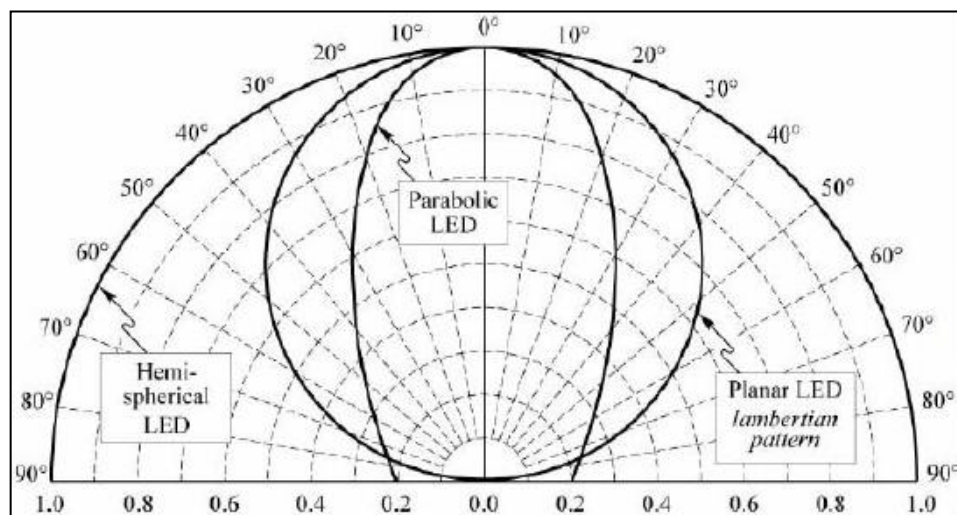


Figura 19

Además de los LEDs convencionales ya nombrados y conocidos por todos, existen otros tipos más novedosos, aunque ya con muchos años en el mercado, como pueden ser los LEDs SMD y los OLEDs entre otros.



Los LEDs SMD provienen de las siglas “Light-Emitting Diode Surface Mount Device”, es decir, es un diodo emisor de luz de montaje superficial. Tiene una capa de resina semirrígida que protege al chip. A diferencia del clásico LED, este dispositivo posee una mayor superficie de semiconductor lo que le permite emitir una cantidad de luz superior comparado con su antecesor. Se puede encontrar con diferentes tamaños y encapsulados, que pueden ir desde unos cuantos milímetros hasta centímetros. Se suelen denominar con el nombre de SMD seguido de las dimensiones del diodo(SMD 3518, SMD 5050). Gracias a su tamaño y su bajo perfil, ha permitido la introducción de la iluminación LED de forma masiva en la mayoría de componentes electrónicos que hasta ahora lo hacían con bombillas halógenas, como pueden ser cuentakilómetros de vehículos o electrodomésticos que antes tenían un par de bombillas y ahora disponen de muchos más indicadores pudiendo instalar muchos más LEDs en una misma placa.



Figura 20

Otro tipo de montaje es el de los LED COB (Chip On Board), que parecidos a los SMD, se diferencian en que en el mismo LED son montados muchísimos chips, consiguiendo de este modo diodos de gran potencia y que emiten una gran cantidad de luz. Estos dispositivos aún no son muy utilizados y tienen como gran desventaja la cantidad de calor que producen y que hay que disipar de manera eficiente para evitar que se dañe.



Figura 21

Además de los LEDs SMD y COB nombrados, un gran avance aún más reciente en este tipo de tecnología es el OLED (Organic Light-Emitting Diode), que ha revolucionado por completo el mundo de las pantallas. Se trata de una fina película de componentes orgánicos que emiten luz cuando se excitan con una corriente eléctrica.

Dentro de los diferentes tipos y montajes existentes, es habitual que cada poco tiempo aparezcan denominaciones nuevas para leves variaciones de los LEDs ya existentes. De este modo los fabricantes intentan hacer propia la nomenclatura de un diodo en concreto tomándolo como propio y exclusivo.

En los usos de estos diodos cabe destacar el papel desempeñado en las televisiones. Hasta ahora, el mercado estaba compartido por las pantallas LCD y las de plasma, además de las mal denominadas pantallas de LED, que no son más que televisores con pantallas LCD retro iluminadas con LEDs por norma general. El uso de los LEDs en lugar de lámparas fluorescentes ofrece un mayor contraste y nitidez, mayor profundidad en los negros al poder apagar esas zonas en lugar de conseguir unos negros artificiales de tono grisáceo mediante las lámparas fluorescentes [6]. Permite también conseguir que el grosor de la parte trasera del televisor disminuya considerablemente y por supuesto, reduce el gasto energético.

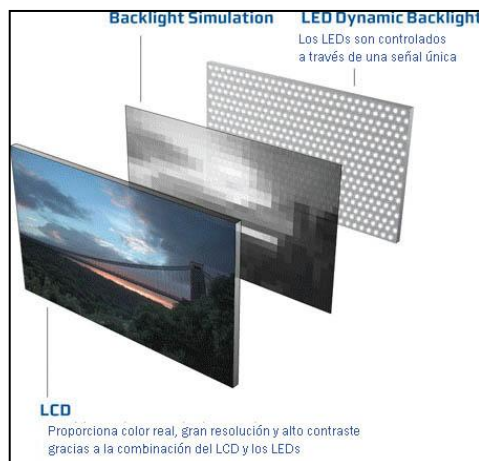


Figura 22

Aún así, también se pueden encontrar paneles compuestos por una matriz de LEDs que forman los diferentes píxeles. Pero generalmente los encontramos en pantallas indicadoras, informativas o publicitarias, es decir, en pantallas en las que la distancia a los LEDs hace que diferenciarlos unos de otros sea más difícil o donde no se requiera una resolución elevada.



Figura 23

Sin embargo con los diferentes tipos de OLED, todas las pantallas de televisores, de ordenadores, dispositivos portátiles como teléfonos móviles, etc., pueden disponer de este tipo de pantalla que proporciona aún más contraste y brillo, mayor ángulo de visión, conseguir dispositivos más delgados, menor consumo e incluso flexibilidad que hará más versátiles todos los dispositivos, pudiendo desarrollar pantallas plegables o enrollables.



La variedad de fabricantes está produciendo que se desarrollen casi paralelamente diferentes tecnologías OLED, haciendo el mercado aún más competitivo y ampliando mucho más la oferta. De este modo podemos encontrar PLEPs (Polymer Light-Emitting Diodes), TOLED (Transparent OLED), SOLED (Stacked OLED), SMOLED (Small Molecule OLED)... A su vez y atendiendo al tipo de matriz que compone la pantalla se pueden clasificar también en AMOLED (Active Matrix OLED) o PMOLED (Passive Matrix OLED).

Dependiendo del uso y características del dispositivo en el que se quieran implementar estos OLED, se usará una matriz y tecnología diferente.

2.3.- LED INFRARROJO

Estos diodos son comúnmente conocidos por utilizarse en la mayoría de mandos a distancia ya sean de televisión, aire acondicionado, etc, donde la distancia entre receptor y emisor es corta. También se pueden encontrar en cámaras y sensores para detectar movimiento o en todo tipo de puertas mecánicas.

Su espectro no es visible y pasa desapercibido al ojo humano.

En esta longitud de onda trabajan las bombillas halógenas utilizadas por ejemplo en restaurantes para mantener la comida caliente o en clínicas de fisioterapia para calentar una zona del cuerpo. Esta funcionalidad no ha sido adquirida mediante diodos debido a su consumo, aunque si se aprecia una emisión de calor superior junto a su haz en este tipo de LEDs respecto a los del resto del espectro. Esta luz también es utilizada para comunicaciones en redes de datos.

2.4.- ESPECTRO VISIBLE

Esta radiación es la comprendida entre las longitudes de onda que van desde los 400nm hasta los 700nm aproximadamente, correspondientes a los colores violeta y rojo respectivamente. Entre estas dos longitudes de onda se encuentran todos los colores del espectro visible. La primera persona en descomponer un haz de luz visible blanco mediante un prisma en los diferentes colores que lo componían fue Newton.

La percepción del color de un material u objeto, depende de cómo la luz se transmite, se refleja o se absorbe en el mismo. Un buen ejemplo es un material transparente, que transmite las longitudes de onda que inciden sobre él, mientras que un objeto amarillo reflejará las longitudes de onda correspondientes al amarillo mientras que absorberá el resto. La absorción, reflejo y transmisión se pueden dar a la vez sobre un mismo objeto.

Una vez la luz llega a nuestros ojos, esta es procesada e interpretada por el cerebro. Este proceso se hace posible debido a que casi todo el interior de la esfera ocular está revestido por una capa de células fotosensibles a la que se le denomina retina.

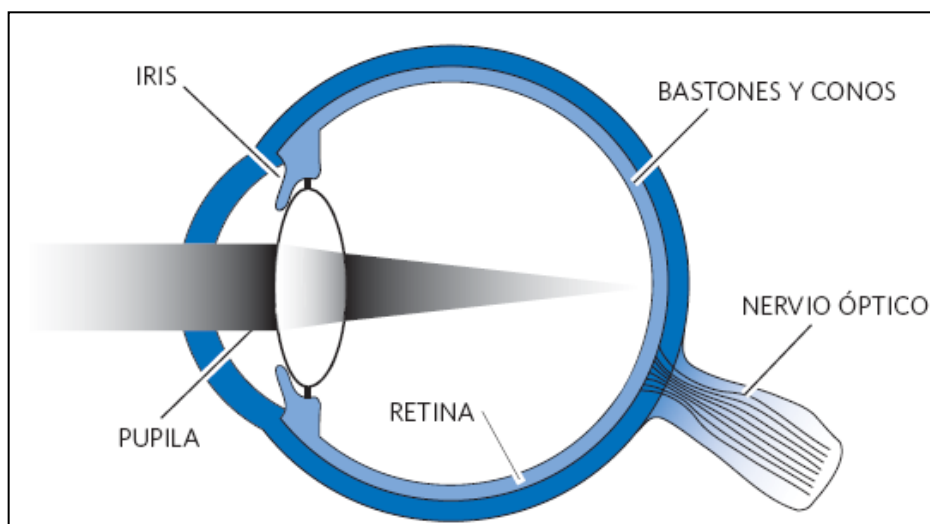


Figura 24

La retina está compuesta por conos y bastones que gracias a los diversos nervios, entre ellos el nervio óptico, transmiten la información al cerebro en forma de impulsos eléctricos. La luz incidente en el ojo antes de llegar a la retina, atraviesa el cristalino habiendo entrado en el ojo a través de la córnea y el iris. Los bastones son más abundantes (unos 120 millones) y más sensibles a la iluminación que los conos, mientras que los conos (aprox. 7 millones) son sensibles a todos los colores del espectro visible.

Hay tres tipos de conos, sensibles a los rangos espectrales correspondientes al color rojo, al verde, y al azul y de ahí su denominación de conos rojos, verdes y azules. En la Figura 25 se muestra gráficamente a qué longitudes de ondas los conos y los bastones tienen más sensibilidad. Estas absorciones óptimas se corresponden a los 430nm, 530nm y 560nm para los conos y a los 510 para los bastones.

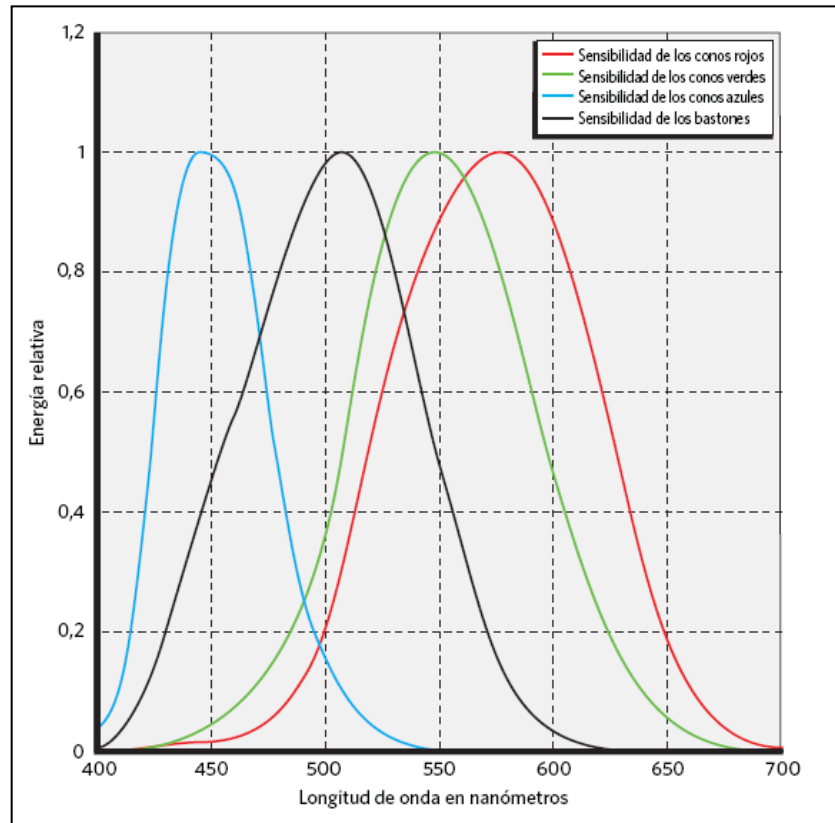


Figura 25

De este modo, el tipo de visión se puede clasificar en fotópica y escotópica. Se habla de visión fotópica cuando la luz ambiente es suficiente y se aprecian todos los colores existentes y visibles al ojo humano mediante los conos y bastones. La visión escotópica se refiere a la visión que se da cuando los niveles de luz son bajos y son principalmente los bastones los que se encargan de interpretar la señal de luminosidad que le llega de los objetos. El sentido del color se pierde en este tipo de visión, por ejemplo de noche, de modo que los objetos pierden su color y los niveles que se perciben son los correspondientes a los diferentes tonos de grises [7].

Aunque para caracterizar las propiedades físicas de la radiación electromagnética se hace uso de unidades radiométricas, no tiene mucho sentido usarlas para hablar del espectro visible humano, ya que en el caso de la radiación infrarroja, por ejemplo, el ojo humano no percibe ningún estímulo. Debido a esto se caracterizará con unidades fotométricas.

Una de las unidades fotométricas es la intensidad luminosa, que se mide en candelas (cd). Se trata de la intensidad de luz que recibe el ojo humano de una fuente emisora de luz. El término candela proviene de la vela (candle en inglés), que se tomó como referencia para medir la intensidad luminosa. Una vela emite una intensidad luminosa de 1.0 cd. Esta magnitud viene definida como la intensidad luminosa que emite una fuente de luz monocromática de 1/683 W a 555nm sobre el ángulo sólido de 1 estereorradián (sr).



Otra unidad fotométrica es el flujo luminoso, que se mide en lúmenes (lm) y está definido como la intensidad luminosa que emite una fuente de luz monocromática de 1/683 W a 555nm. Un lumen representa la cantidad potencia luminosa que recibe el ojo humano. Se diferencia del flujo radiante, en que este último tiene en cuenta toda la radiación electromagnética que emite la fuente, sin entrar en si es percibida o no por el ojo.

Por tanto:

$$1 \text{ lm} = 1 \text{ cd} \cdot \text{sr}$$

Ecuación I

En el caso de que una fuente de luz con una intensidad luminosa de 1cd no emitiera en una dirección determinada, si no que fuera isotrópica, su flujo luminoso sería de:

$$\text{lm}_{\text{isotrópica}} = 1 \text{ cd} \cdot 4\pi \text{ sr} = 12.566 \text{ lm}$$

Ecuación II

Por último, la iluminancia o nivel de iluminación, medida en lux . Se trata de la cantidad de flujo luminoso que incide sobre una superficie por unidad de área. Al igual que las candelas y los lúmenes, también pertenece al Sistema Internacional de Unidades (SI).

$$1 \text{ lux} = 1 \frac{\text{lum}}{\text{m}^2}$$

Ecuación III

Para hacerse una idea de la iluminancia en diferentes ambientes, se adjunta la siguiente tabla:

Tipo de iluminación	Iluminancia
Luna llena	1 lux
Alumbrado público	10 lux
Alumbrado de hogar	De 30 a 300 lux
Alumbrado de oficina	De 100 a 1000 lux
Alumbrado de quirófano	10000 lux
Luz solar directa	100000 lux

Tabla I

El sentido de que la candela y el flujo luminoso estén referenciados a 555nm, se debe a que la función de sensibilidad del ojo toma su valor máximo para esta longitud de onda por lo que se establece como la unidad. Esto quiere decir que el pico de sensibilidad del ojo se encuentra a 555nm, lo que apreciamos como color verde.

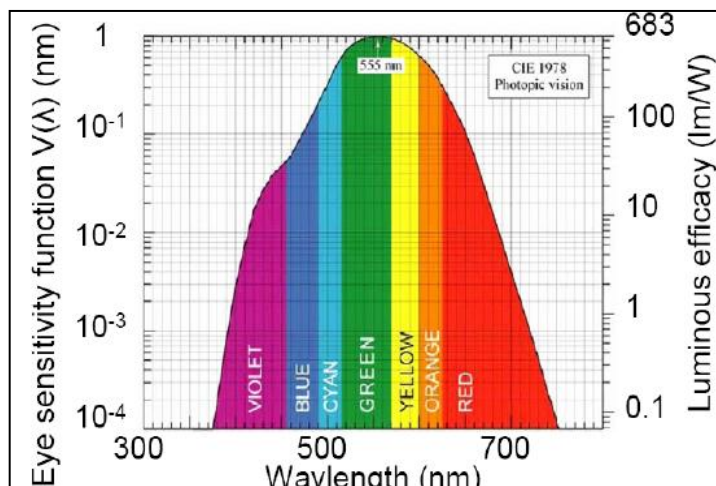


Figura 26

Como se muestra en la figura anterior donde se define la rentabilidad de conversión de potencia eléctrica en luz visible, no a todas las longitudes de onda se tiene la misma sensibilidad. Incluso por encima de los 700nm y por debajo de los 400nm, el ojo es sensible a luz pero con niveles de sensibilidad muy bajos.

Las unidades fotométricas descritas anteriormente como la intensidad luminosa, el flujo luminoso y la iluminancia, derivan de la intensidad de radiación, el flujo radiante y la irradiancia respectivamente, que son unidades radiométricas.

2.4.1.- LED ROJO

Fue el primero en aparecer y con él se empezó a introducir esta tecnología en los instrumentos del día a día e incluso en las redes de comunicación.

Dentro de los diodos que emiten en este espectro se encuentran los RCLEDs (Resonant Cavity Light Emitting Diode), que aunque también emiten en el espectro del naranja y el amarillo es más habitual su uso en el rojo para comunicaciones. Puede trabajar a velocidades superiores a los 400Mbps y en un rango de temperaturas que va desde los -40°C hasta casi los 100°C de temperatura.



2.4.2.- LED AMARILLO Y VERDE

El descubrimiento del amarillo en el año 1972 hizo que esta tecnología alcanzara niveles de luminosidad de hasta 10 veces superiores a los que se conocían hasta entonces con los rojos.

Casi 30 años después aparece el color verde, quedando a tan solo un paso la capacidad de reproducir cualquier color del espectro visible. Es entonces cuando la búsqueda del color azul se convierte en un auténtico reto.

2.4.3.- LED AZUL

Con dos de los colores primarios en el mercado, estaba abierta una auténtica guerra comercial en búsqueda del que faltaba, que abriría la puerta para conseguir todos los colores del espectro visible y por tanto a la fabricación de paneles, televisiones, y todo tipo de dispositivos mediante LEDs. El fabricante que tuviera acceso a este diodo sería el primero en empezar a desarrollar nuevas tecnologías posicionándose a la cabeza en ese mercado. Todo esto sin olvidar el mercado de la iluminación en la hogares, vía pública, etc, al obtener el color blanco casi a la vez.

Tras décadas trabajando e investigando en la tecnología LED, este momento no llega hasta principios de los 90 cuando se inventa el LED azul al que se le puede dar un uso práctico. Este dio paso a conseguir el blanco gracias inicialmente al fósforo. Hasta entonces los colores conseguidos habían sido el rojo, el verde y el amarillo lo que limitaba bastante el uso de esta tecnología. Aunque ya se habían observado diodos emisores de color azul, su emisión era muy pobre, el tiempo de vida muy corto y se necesitaba grandes cantidades de energía para funcionar. Esto era producido en gran medida a que el ojo tiene una baja sensibilidad para esa longitud de onda, por lo que para conseguir la misma sensación que uno verde es necesaria más energía.

Concretamente fue Shuji Nakamura quien inventó este diodo emisor azul, que pasó a fabricarse en 1993 por la Corporación Nichia donde trabajaba.

2.4.4.- LED BLANCO

Uno de los campos de gran interés de aplicación de estos LEDs blancos es la iluminación en general, por su similitud a la luz solar, donde compiten con las fuentes de iluminación convencionales como las lámparas incandescentes y las fluorescentes. Los LEDs blancos pueden ser usados en aplicaciones de señalización y en pantallas, pero su uso potencial es para iluminación en cualquier ámbito general como lo haría una bombilla cualquiera.

Dentro del blanco existen diferentes tonalidades, distinguidas por su temperatura de color expresada en kelvin. De este modo un blanco puro se corresponde a las temperaturas cercanas a los 5000K-5500K, mientras que un blanco frío que tiene tonalidades azuladas está por encima de los 6000K. Los fabricantes también han desarrollado temperaturas de color más bajas, por debajo de los 4000K correspondientes a un blanco cálido y llegando al amarillo, conscientes del amplio negocio existente en la iluminación interior y sobretodo de hogares, siendo este tipo de iluminación más acogedora.

Pero la percepción como luz blanca emitida por un LED no es tan trivial como parece. Se percibe así, si los tres tipos de conos localizados en la retina del ojo humano son excitados de cierto modo. Para el caso de la luz blanca, los valores del triestímulo tienen que ser valores como los colores localizados cerca del centro del diagrama de cromaticidad o triángulo de Maxwell.

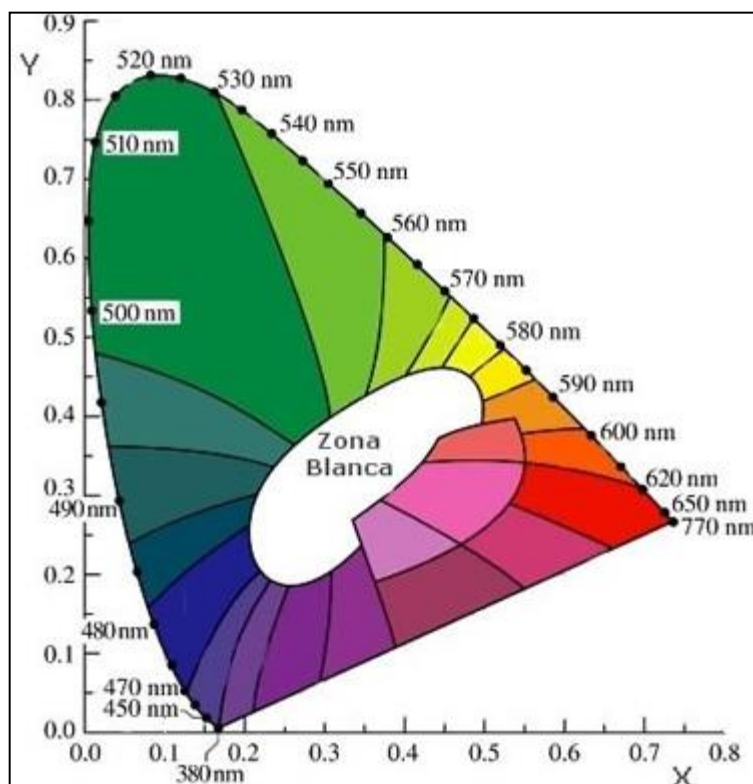


Figura 27

Pero el color blanco también puede ser generado con la combinación de dos longitudes de ondas específicas. Esta combinación provoca una percepción para el ojo que lo interpreta como color blanco. Las longitudes de onda de estos colores complementarios se muestran en la Tabla II [1].



Complementary wavelengths		Power ratio
(nm)	(nm)	P/P
380	560.9	0.000642
390	560.9	0.00955
400	561.1	0.0785
410	561.3	0.356
420	561.7	0.891
430	562.2	1.42
440	562.9	1.79
450	564.0	1.79
460	565.9	1.53
470	570.4	1.09
475	575.5	0.812
480	584.6	0.562
482	591.1	0.482
484	602.1	0.440
485	611.3	0.457
486	629.6	0.668

Tabla II

Otro modo de generar la luz blanca es mediante la emisión de tres colores. Al igual que antes, si estos tres colores son emitidos con cierta longitud de onda y cierta potencia, la combinación de colores es percibida como blanco.

Todavía hay otro modo de generar luz blanca y es mediante un emisor de banda ancha que emita en todo el espectro visible. Este emisor se aproximaría al espectro del Sol y su luz se percibiría como si de luz solar se tratase. Pero aún hay más maneras de generar luz blanca, por ejemplo mezclando un emisor de banda ancha y un emisor discreto.

En cuanto a la utilización de materiales conversores de longitud de onda, que es otro de los procesos para conseguir luz blanca, existen varios tipos como es el uso del fósforo, de semiconductores o de colorantes. Estos materiales tienen algunas características interesantes, como la absorción de ciertas longitudes de onda, su longitud de onda emitida y su eficiencia.

Se pasará a explicar en primer lugar el conversor de longitud de onda mediante un semiconductor. Estos diodos están compuestos de un LED que emite una longitud de onda y de un conversor de longitudes de onda. Alguna, o toda la luz emitida por el LED, es absorbida por el material conversor y reemitida como luz con otra longitud de onda. Comúnmente este proceso es definido como reciclaje de fotones. Como resultado, el LED emite al menos dos longitudes de onda diferentes. A estos tipos de diodos se les denomina PRS-LED (photon-recycling semiconductor).

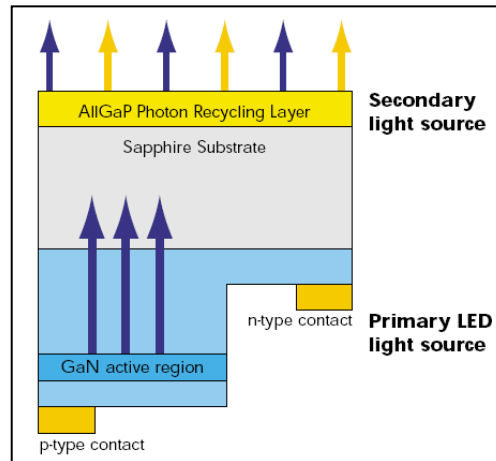


Figura 28

Otro de los métodos dentro de los conversores es el uso del fósforo como se comentaba, que consiste en un material inorgánico dopado con elementos ópticos activos. El dopante óptico activo es un elemento de rara naturaleza.

La absorción óptica y el espectro de emisión de fósforo comercial se muestran en la Figura 29.

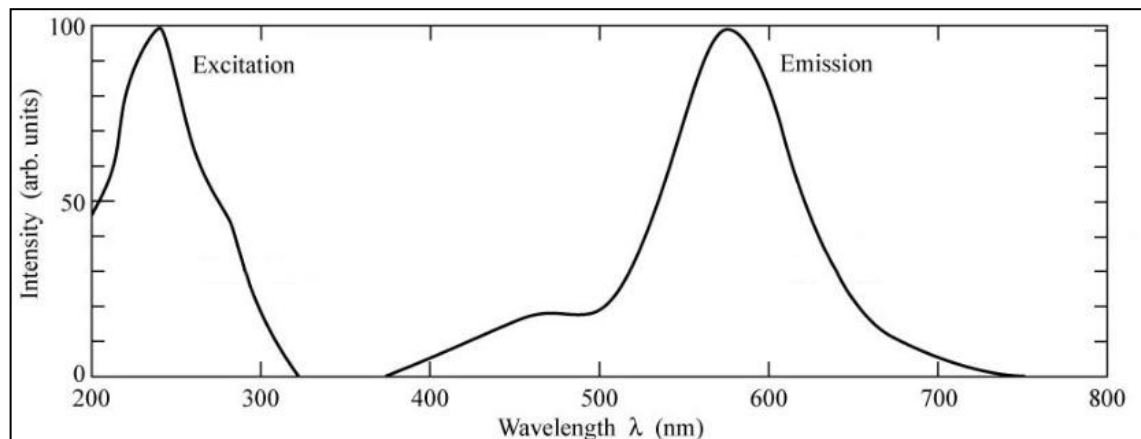


Figura 29

El fósforo es muy estable y puede tener eficiencias cercanas al 100%. Para crear la luz blanca con este método, se usan LEDs tanto azules como de ultravioleta. El fósforo se encuentra recubriendo todo el diodo gracias a la resina epoxi que a la vez lo protege. Como se muestra en la Figura 30 la luz azul es absorbida por el fósforo y reemitida con otra longitud de onda.

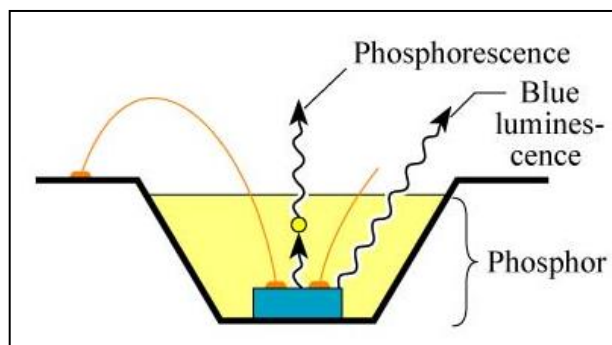


Figura 30

El uso de los UV para generar luz blanca es menor que al de los azules debido a que las pérdidas de energía en la conversión UV a luz blanca son mayores que en los azules.

Por último, los colorantes son otro tipo de conversores de longitud de onda. Actualmente hay disponibles diferentes colorantes en el mercado. Al igual que el fósforo, los colorantes rozan una eficiencia del 100%. Sin embargo, como molécula orgánica carece de estabilidad a largo plazo como el fósforo y los semiconductores.

Todos estos métodos son igual de válidos. Al tener diferentes caminos para generar la luz blanca se plantea el problema de cuál de los modos anteriores es el óptimo para hacerlo. Para ello hay que considerar dos parámetros. Primero, la eficiencia lumínica y segundo, el índice de rendimiento del color. Este índice indica la calidad de reproducción de los colores de un objeto iluminado por una fuente de luz, referenciado a la luz del sol y siendo esta de un índice del 100%. Por poner un ejemplo, para aplicaciones de señalización, la eficiencia lumínica es lo más importante mientras que el índice de rendimiento del color es irrelevante, lo importante es ver las señales aunque los colores no sean fielmente reproducidos con esa luz. Sin embargo, para iluminación, ambas son importantes. Dependiendo el uso que se le vaya a dar será más conveniente el uso de un tipo u otro de LEDs.

Las fuentes de luz blanca que utilizan dos colores monocromáticos complementarios se encuentran en la cima de la eficacia lumínica. Sin embargo, el índice de rendimiento del color como fuente de luz dicromática es menor que la de los emisores de banda ancha.

En la Figura 31 se muestran gráficamente algunos de los procesos de emisión de luz blanca explicados con anterioridad.

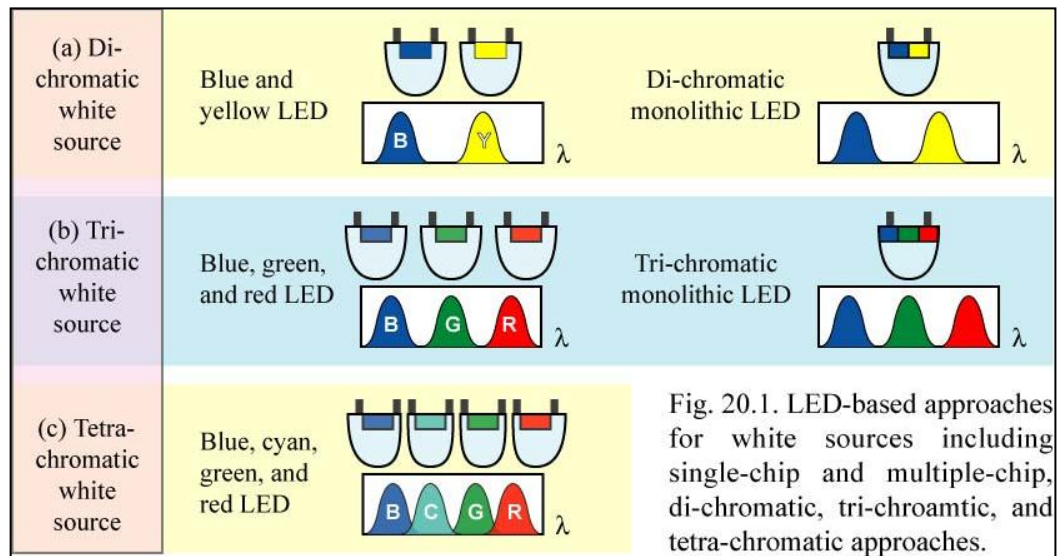


Figura 31

Las ventajas en cuanto a iluminación se refiere para estos LEDs blancos son más que evidentes. Mientras que las fuentes de luz convencionales tienen una eficiencia lumínica entre los 15-100 lm/W, los LEDs blancos sobrepasan los 300 lm/W.

2.4.5.- LED TRICOLOR y BICOLOR

Los LEDs tricolores se caracterizan por tener en el mismo encapsulado el equivalente a 3 LEDs diferentes, cada uno de un color, siendo un único LED. Se les conoce como LEDs RGB debido a los colores con los que trabaja que son el rojo, el verde y el azul (R=Red, G=Green, B=Blue). Estos colores son aditivos, combinando o mezclando estos tres colores primarios con diferentes proporciones, se puede conseguir la gran mayoría de los colores. Se suelen utilizar principalmente como luz de ambiente y decorativos, ya que en un espacio muy reducido puedes conseguir casi cualquier color. Disponen de 4 patillas o terminales, 3 para cada color y cátodo común.

Los LEDs bicolor, análogamente como los tricolor, dispone de 3 terminales (2 para los diferentes colores y otra común), emitiendo en dos longitudes de onda diferentes. Como curiosidad se pueden encontrar con sólo 2 patillas, de modo que si la corriente circula hacia un lado un diodo conduce y el otro está al corte, y viceversa.

Excepto en el último caso nombrado, para el resto de diodos es necesario un controlador que permita el paso de corriente en función del color elegido previamente.

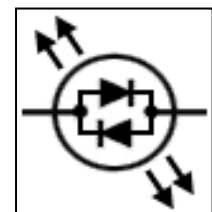


Figura 32



2.5.- UV

La luz ultravioleta (10-400nm), llamada habitualmente luz negra, es invisible para el ojo humano y se sitúa entre los rayos X y el espectro visible. Sin embargo hay lámparas que emiten parte de su luz en la zona cercana al espectro visible haciendo que las percibamos como violetas. Su banda puede dividirse en varios grupos: UVA(400-315nm), UVB (315-280), UVC(280-200nm) y ultravioleta lejano (200-10nm)

Es popular debido, en gran medida, a su uso mediante fluorescentes en discotecas y fiestas, donde hace que algunos materiales brillen y donde se están empezando a utilizar barras con muchos LEDs con el mismo fin. También se usan para identificar las marcas de agua en documentos o billetes y para esterilización y desinfección.

Estos LEDs fueron inventados en la década de los 90 junto a los azules. Aunque la mayoría emiten en la sub-banda UVA donde sus eficiencias no son muy altas (~7% para 365nm y cerca del 20% para 395nm), también se han obtenido en el UV profundo usando nitruro de aluminio (210nm), nitruro de boro (215nm) y diamante (235nm). [8]

2.6.- POWER LED

Los LEDs de potencia son aquellos semiconductores que tienen un consumo del orden de vatios, es decir se caracterizan por su consumo y no por la cantidad de luz emitida. También son denominados de alto brillo, aunque no todos los LEDs de alto brillo son LEDs de potencia. Para que un LED sea de alto brillo basta con que emita un flujo luminoso superior a unos 50 lúmenes, por lo que podemos llegar a esa cifra con semiconductores que tengan un consumo muy bajo.

Su diferencia respecto a los LEDs convencionales es que conducen mayor cantidad de corriente emitiendo normalmente mayor flujo luminoso. Lógicamente su calentamiento es mayor, por lo que generalmente disponen de disipadores de calor en sus montajes para evitar que se dañen. Esta disipación de calor es también superior al de los LED normales gracias a encapsulados con mejor rendimiento térmico que disminuyen el valor de la resistencia térmica.

Las ventajas son las mismas que aportan el resto de diodos emisores de luz (eficiencia, bajo consumo respecto a las bombillas convencionales, tiempo de vida mayor, dimensiones reducidas, etc) con la diferencia que estos además de como indicadores o como luz de corto alcance, amplían su rango de utilización a cualquier uso pudiendo sustituir a la gran mayoría de luminarias convencionales.

En este punto hay que mencionar los microLEDs, que no son más que una “evolución” de los LEDs convencionales ya nombrados, concentrando varios diodos en una misma pastilla. En realidad es la misma tecnología por lo que no se pueden diferenciar de los powerLED en ese aspecto, sólo cambia el encapsulado. Se caracterizan por ser mucho más pequeños que los LEDs pudiendo conseguir la misma iluminación en un espacio más reducido. La principal desventaja, como siempre en el mundo de los LEDs, es el calor producido. La gestión térmica en estos dispositivos es aún más complicada al contener en la misma superficie mayor cantidad de diodos por lo que disponen de disipadores aún más grandes para la misma superficie de LED. Se llegan a conseguir en una única luminaria consumos de 50W.

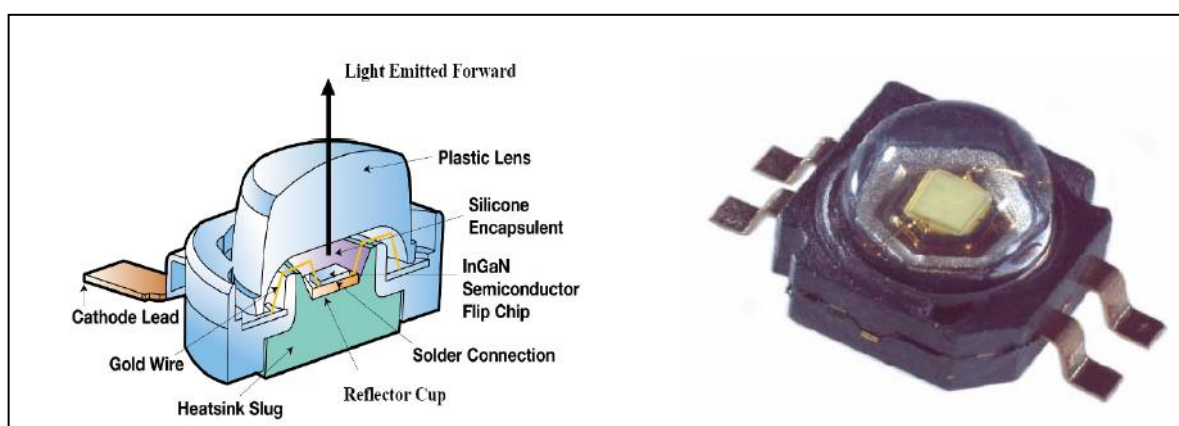


Figura 33

Estos tipos de LEDs han llegado incluso a sustituir a las bombillas halógenas en los faros de proyección de algún vehículo de alta gama y últimamente en algún vehículo de gama media equipándolo de serie.

Además se están desarrollando faros inteligentes, que jugando con las matrices de diodos producen triángulos de sombra que mejoran considerablemente el alumbrado del vehículo tanto en corta como a larga distancia y evitando el deslumbramiento. En este aspecto, su coste a día de hoy es aún elevado y por tanto este tipo de ópticas no se usan habitualmente. Sin embargo el uso de estos LEDs como luz diurna para ser vistos se está extendiendo en todos los fabricantes y montándose de serie en la mayoría de modelos, proporcionando más presencia de los vehículos en carretera y ayudando a ser vistos con antelación [9]



Figura 34

En alumbrado público su uso también está extendiéndose gracias en gran parte a la adaptación de los fabricantes para reciclar los cuerpos de las luminarias ya existentes, fabricando kits que permiten la sustitución de la bombilla convencional por placas de LED de alta potencia. De este modo la principal barrera del paso a la tecnología LED, la inversión inicial, se reduce. Esto unido al ahorro en mantenimiento a largo plazo de estos dispositivos hace que se rentabilice el uso de LEDs en menos tiempo. En la Figura 35 se pueden apreciar la diferencia entre las dos luminarias, la de la izquierda con alumbrado convencional y la de la derecha la misma vía con alumbrado mediante LEDs de potencia para la misma carrereta.



Figura 35

Debido al calor producido por este tipo de diodos, estos puntos de luz son fabricados de modo que su cuerpo disipe de manera eficiente el calor. Para ello se han reinventado los diseños de los reflectores optimizando también la cantidad de luz emitida por el conjunto [10]. Poco a poco, y debido a sus ventajas, estos LEDs irán sustituyendo al igual que hicieron los LEDs normales al resto de bombillas.



Figura 36

2.6.- LASER

A principios de la década de los cincuenta se desarrolló el máser (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiaton), que como su nombre indica se trata de un amplificador de microondas de muy bajo ruido. Funcionaba empleando directamente la interacción mecánico-cuántica de la materia con la energía radiante. Poco después a su invención, se trató la posibilidad de aplicar la misma técnica a la región óptica del espectro. En 1958, Townes y Arthur L. Schawlow establecieron las condiciones físicas generales necesarias para conseguir la amplificación de la luz a través de la emisión estimulada de la radiación. Dos años después, en 1960, Theodore H. Maiman dio a conocer la primera operación exitosa llevada a cabo con máser óptico o láser.

Históricamente se obtuvo primero una fuente de radiación coherente a frecuencias de microondas (MASER) que a frecuencias ópticas (LASER), debido a que cuanto mayor es la frecuencia (menor longitud de onda) menor es la coherencia, y por tanto más complicado de conseguirla.

El láser, es un dispositivo basado en el mecanismo de emisión estimulada de un nuevo fotón como consecuencia de la interacción de un sistema atómico excitado y de un fotón que interactúa con el mismo. El nuevo fotón emitido tiene la misma longitud de onda, la misma fase y la misma dirección de propagación que el fotón inicial que dispara el proceso. Esta emisión estimulada fue propuesta por A. Einstein en 1917 como un posible mecanismo de emisión de luz por las estrellas.



En otras palabras, la emisión estimulada se genera debido a que algunos átomos del nivel excitado son inducidos por la radiación exterior a caer al nivel de base, generando nuevos fotones coherentes con los existentes. Este nuevo fotón se dice que se halla en el mismo modo de radiación que la onda incidente y tiende a sumarse a ella, aumentando su densidad de flujo. Sin embargo, debido a que normalmente la mayoría de los átomos se encuentran en el estado fundamental, la absorción es bastante más probable que la emisión estimulada. Es por esto, que si un porcentaje importante de los átomos se pudiera excitar hacia un estado o nivel superior, dejando el inferior vacío, la probabilidad de que se produzca la emisión estimulada sería mucho más elevada. A este proceso se le denomina inversión de población. [1]

Por tanto, un fotón incidente de frecuencia apropiada podría entonces poner en movimiento un sinnúmero de fotones estimulados (todos en fase). La onda inicial continuaría creciendo siempre que no hubiera procesos competitivos dominantes como esparcimiento y siempre que se mantuviera la inversión de población. Para ello, se bombearía energía para sostener la inversión y se extraería un haz luminoso después de recorrer el medio activo.

Existen diferentes formas de producir este efecto de bombeo (“pumping”) al sistema:

- Bombeo Óptico: descargas de un tubo de flash, bombeo por otro láser, etc.
- Bombeo Eléctrico: inyectando una alta densidad de corriente en el dispositivo.
- Bombeo Electromagnético: Campo de radiofrecuencia.
- Bombeo Químico
- Otros sistemas...

El medio activo del primer láser operativo era un pequeño rubí rosa pálido, cilíndrico y sintético. El rubí, que sigue siendo uno de los medios cristalinos más comunes para láser, había sido utilizado anteriormente en aplicaciones para máser y fue Schawlow quien aconsejó su uso en el láser. Las caras de los extremos de la barra se pulieron hasta quedar planas, paralelas y normales al eje. A continuación, se platearon ambas (una sólo parcialmente) para formar una cavidad resonante.

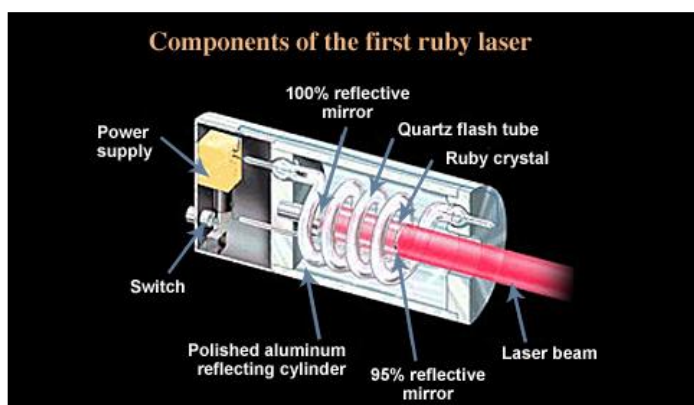


Figura 37

La barra estaba rodeada de por un tubo helicoidal de descarga gaseosa de destello que suministraba el bombeo óptico de banda ancha. Al dar corriente, en el tubo de destello se genera una ráfaga intensa de luz que dura unos pocos milisegundos. Mucha de esta energía se pierde en calor pero muchos de los iones se excitan en las bandas de absorción. Los iones excitados se relajan rápidamente (unos 100ns), cediendo la energía a la red del cristal y dando lugar a transacciones no radiativas. Prefieren “bajar” a un par de estados provisionales, muy cercanos, de vida particularmente larga, permaneciendo en estos estados metaestables por varios milisegundos (aprox 3ms a temperatura ambiente) antes de bajar al azar y en muchos casos, espontáneamente, al estado fundamental. Este paso se acompaña de la emisión de la radiación roja fluorescente característica del rubí. La transición de nivel inferior predomina mientras que la emisión resultante ocurre en un rango espectral relativamente ancho centrado alrededor de los 694nm, emerge en todas direcciones y es incoherente [11]

Aumentado la velocidad de bombeo, se produce la inversión de población y así los primeros fotones emitidos espontáneamente estimulan una reacción en cadena. Un cuanto excita la emisión rápida en fase de otro, pasando energía de los átomos metaestables a la onda luminosa en desarrollo. La onda continúa creciendo a medida que recorre el medio activo hacia delante y hacia atrás (suponiendo que haya suficiente energía disponible para superar las pérdidas en los extremos, donde se encuentran los espejos). Como una de esas superficies reflectantes no lo era completamente, un intenso pulso de luz láser roja emerge del extremo de la barra de rubí.

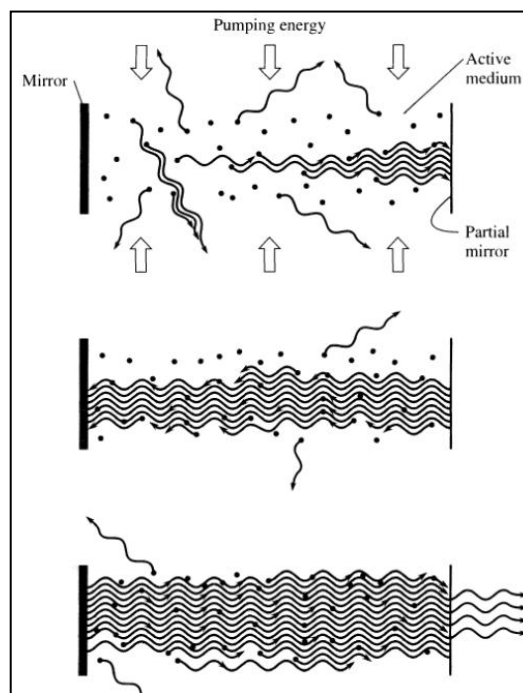


Figura 38



Estamos ante un láser llamado de tres niveles, ya que el sistema atómico consiste en efecto en las bandas de absorción, el estado metaestable y el estado fundamental.

El láser de rubí que conocemos actualmente es generalmente una fuente de gran potencia de radiación coherente pulsada, que funciona con longitudes de coherencia que oscila entre 0.1m y 10m. Normalmente las configuraciones modernas disponen de espejos externos planos, de los cuales uno refleja totalmente y el otro sólo parcialmente. El típico láser de rubí comercial funciona con una eficiencia global modesta, inferior al 1%.

Uno de los elementos más importantes para que el láser opere es la calidad resonante que en este caso es un etalón de Fabry-Perot. Este interferómetro actúa a modo de un filtro en “peine” sobre el espectro de la radiación incidente sobre el mismo. En las primeras fases del proceso láser se emiten fotones espontáneos en todas las direcciones al igual que fotones estimulados. Excepto los que se propagan a lo largo del eje de la cavidad, el resto de fotones salen rápidamente por los lados del rubí. Sin embargo el rayo axial sigue creciendo a medida que se refleja una y otra vez a través del medio activo. Aunque el medio actúa para amplificar la onda, la alimentación óptica proporcionada por la cavidad convierte el sistema en un oscilador y, por tanto, en un generador de luz.

La onda que se propaga dentro de la cavidad adquiere una configuración de onda estacionaria determinada por la distancia entre los espejos. La idea es que haya simplemente un nodo en cada espejo y esto puede ocurrir solo cuando la separación entre los espejos es igual a un número entero múltiplo de $\frac{\lambda}{2}$. Por tanto, existe un número infinito de posibles modos de oscilación longitudinales de la cavidad, cada uno con una frecuencia particular. La cavidad seleccionará y amplificará solo ciertas bandas estrechas de estas frecuencias y, llegado el caso, incluso una sola de estas bandas. Este es el motivo de que el láser genere una luz casi monocromática.

Para conseguir generar un único modo en la cavidad sería necesario que la separación entre modos superara el ancho de banda de transición. Con un láser de rubí, una cavidad con unos pocos centímetros de largo, permitiría fácilmente operar con un modo único longitudinal. La desventaja de este láser sería que la longitud de la región activa que aporta energía al rayo, sería pequeña limitando así la potencia de salida del láser.

En el láser pueden también sostenerse modos transversales, además de los modos longitudinales de oscilación. Como los campos son casi normales a z (eje de propagación de la onda) reciben el nombre de modos TEM_{mn} (transversales electro-magnéticos). Los subíndices son el número entero de líneas nodales transversales en las direcciones X e Y a través del rayo emergente. El orden más bajo o modo transversal TEM_{00} es el más empleado por varias razones importantes: no hay desfases en el campo eléctrico a través del rayo como los hay en otros modos siendo totalmente coherente espacialmente; la divergencia angular del

haz es la más pequeña, pudiendo enfocarse al punto más pequeño. En las dos imágenes se muestran los modos de un resonador óptico cilíndrico y un láser de cavidad rectangular.

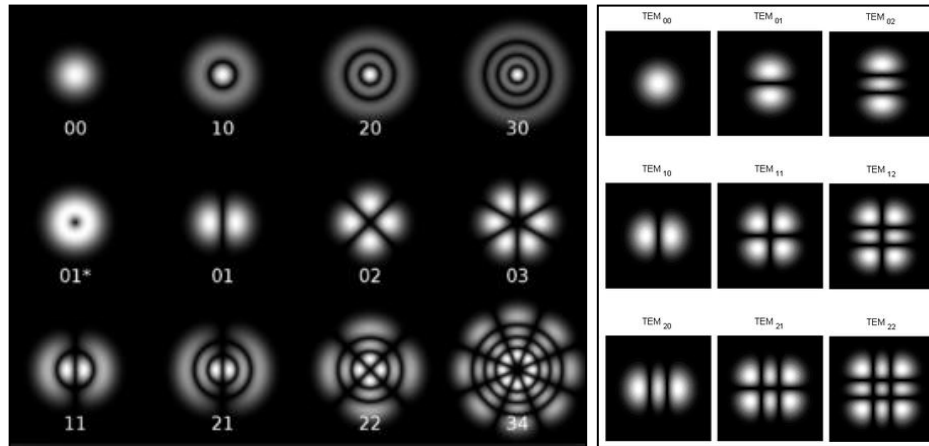


Figura 39

Dependiendo del tipo de láser se emplean dos espejos paralelos o curvos de diferentes características. En el caso del diodo láser semiconductor, los espejos se reemplazan por el efecto que produce la reflexión de Fresnel en las dos caras opuestas muy pulidas

3.- FIBRA ÓPTICA

La fibra óptica se usará en este proyecto como canal para la transmisión de la luz, conectando un extremo al espectrómetro y el otro extremo a un conector SMA al aire como receptor de las emisiones de los LEDs. La entrada óptica del espectrómetro mediante fibra hace que el haz de luz a medir llegue en buenas condiciones. Su longitud de 2 metros y tiene 600um de diámetro.

En el caso de que se quisiera usar la fibra óptica como canal de comunicación, las ventajas que ofrecería frente al cable de cobre convencional es menor atenuación y por tanto capaz de enviar datos a mayores distancias, tasas de transmisión de datos mucho más elevada, sin producir interferencias ni que le afecten los campos electromagnéticos, mayor flexibilidad, menor peso, en definitiva multitud de ventajas frente al uso del cobre. Como desventajas se puede mencionar su coste que es más elevado, su fragilidad, su dificultad de instalación en las zonas debido a los empalmes, coste de los equipos para transmitir y recibir la información y difícil acoplamiento de la fuente de luz entre otras [12].

En este caso, no todas las fibras son iguales, pudiendo encontrar dos grandes grupos: las fibras monomodo y las multimodo. Para comunicaciones en general se usa la fibra monomodo, mientras que la multimodo se utiliza para distancias cortas. Se diferencian en que en la monomodo, como su nombre indica, solo hay un modo de luz que se puede propagar a través de ella, teniendo un núcleo mucho menor, es decir solo hay un recorrido óptico que el rayo de luz puede seguir una vez que ha entrado en el núcleo. Sin embargo en la multimodo puede haber varios o muchos de ellos.

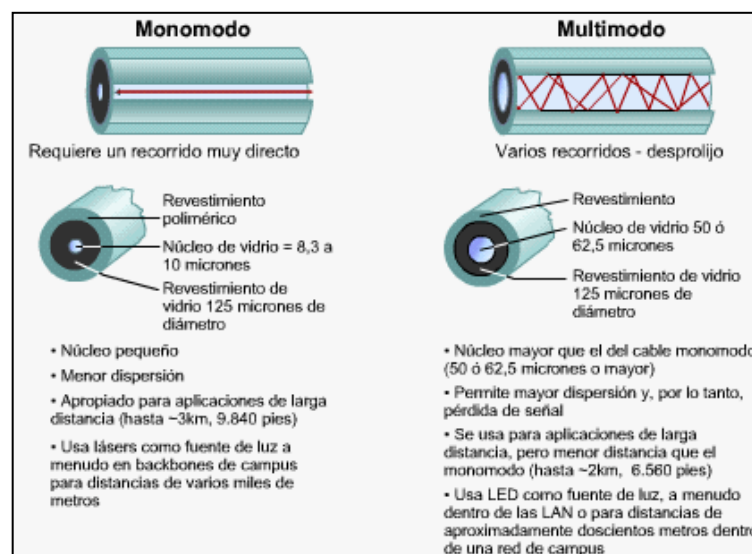


Figura 40



Aparte de todo esto, también se pueden clasificar dependiendo de si son fibras ópticas de salto de índice o gradual, según su estructura ,etc.

En este proyecto el uso que se le va a dar a la fibra óptica es simplemente para transportar la luz emitida por el diodo a un espectrómetro cercano, no se usará para transmisión de datos, por lo que no será necesario entrar a valorar las ventajas que aportaría en este caso el uso de un tipo de fibra o de otro, puesto que serían prácticamente despreciables.

4.- ESPECTRÓMETRO

Para la realización de la práctica se ha utilizado el espectrómetro AvaSpec 2048 Fiber Optic de la marca Avantes.

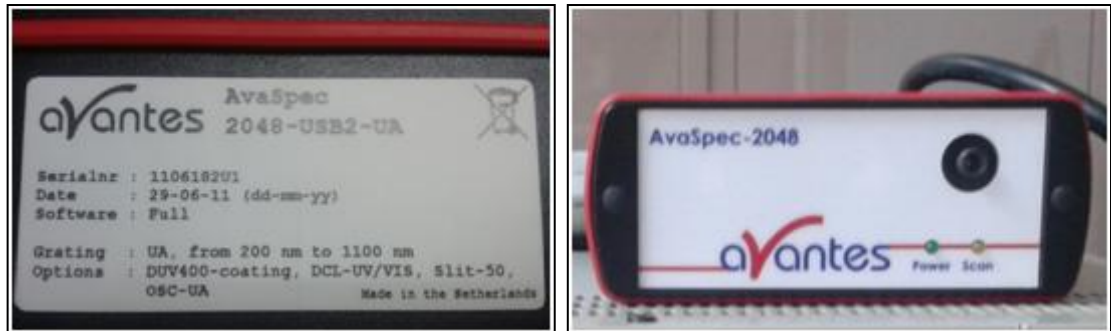


Figura 41

Se trata de un espectrómetro con entrada para fibra óptica de un solo canal, con dos LEDs en el frontal que indican si está encendido (POWER) y si está midiendo (SCAN)

- Detector: Array lineal CCDs de 2048 píxeles.
- Rejilla: 50micras. 300 Lineas/mm
- Rango de longitud de onda: 200nm-1100nm (175nm-1325nm en la práctica)
- Interfaz con el ordenador: USB 2.0
- Rango de integración: 2ms-2s
- Dimensiones: 175 x 110 x 44 mm

Grating selection table for AvaSpec-2048					
Use	Useable range	Spectral range (nm)	Lines/mm	Blaze (nm)	Order code
UV/VIS/NIR	200-1100	900	300	300	UA
VIS/NIR	360-1100	900	300	500	VA
UV/VS	200-850	500	600	250	UB
UV/VS	200-850	500	600	400	EB
UV	200-500	250	1200	250	UC
UV	200-550	180	1800	250	UD
UV	200-400	125	2400	250	UE
VS	360-850	500	600	500	VB
VS	400-980	250	1200	500	VC
VS	400-980	180	1800	500	VD
NIR	500-935	500	600	750	NB
NIR	500-1000	250	1200	750	NC
NIR	600-1100	500	600	1000	IB

Tabla III



Como se observa en la Tabla IV nuestro modelo de espectrómetro tiene una rejilla de 300 líneas por milímetro.

Resolution table (FWHM) for AvaSpec-2048						
Grating (lines/mm)	Slit size (μm)					
	8*	25	50	100	200	500
300	0.8	1.2	2.5	5.0	10.0	25.0
600	0.4	0.6	1.2	2.5	5.0	12.0
1200	0.2	0.3	0.6	1.2	2.5	6.0
1800	0.15	0.22	0.4	0.8	1.6	4.5
2400	0.1	0.15	0.3	0.6	1.2	3.0

* = fiber diameter

Tabla IV

El espectrómetro se encarga de separar las componentes de un espectro óptico mediante un prisma o una rejilla de difracción. La rejilla de difracción tiene un patrón regular que produce que la luz se divida en diferentes haces que viajan en diferentes direcciones. Este patrón está definido por el tamaño de la rendija que forma la rejilla y la distancia entre ellas que es la misma una de otras y que es del mismo orden que la longitud de onda incidente. En la Figura 42 se pueden observar de izquierda a derecha los diferentes patrones de difracción para cuatro rejillas de 1, 2, 5 y 20 rendijas.



Figura 42

En espectroscopia, el uso de la rejilla de difracción se usa para determinar de qué están compuestos químicamente los planetas, estrellas, etc, únicamente analizando el espectro de la luz que nos llega.

4.1.- SOFTWARE DEL FABRICANTE

Junto al espectrómetro se facilita un software encargado de tratar las muestras capturadas por el espectrómetro. Este programa aunque nos permite multitud de funcionalidades para el

análisis del espectro de cualquier fuente de luz, no es compatible para trabajar con entornos como MATLAB o Arduino.

En la Figura 43 se obtiene el espectro de una habitación iluminada con luz solar y con fluorescentes blancos. Se aprecia que el suelo de ruido es elevado y varios picos característicos que no se corresponden a la luz solar, si no posiblemente a cualquier otro dispositivo que hubiera en la habitación.

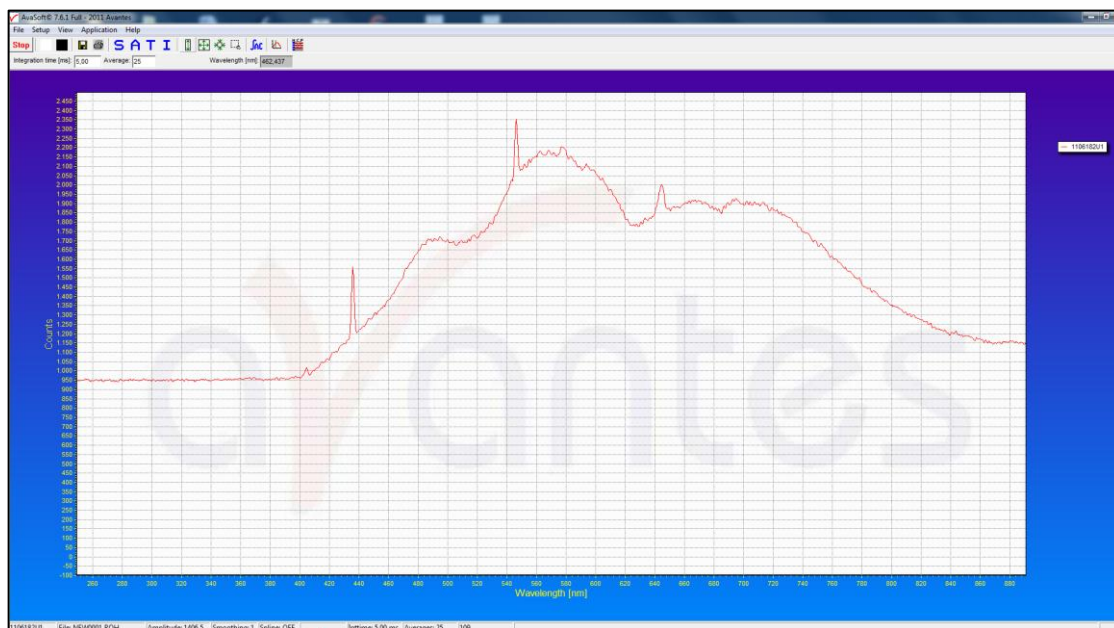


Figura 43

Además del espectrómetro y su respectivo software, se han adquirido las librerías del mismo para poder trabajar libremente con ellas debido a las limitaciones de uso que tiene el software del fabricante para el desarrollo del proyecto. Estos archivos adquiridos no son de código abierto, por lo que son proporcionados por Avantes previo pago. Una vez obtenidos se procederá a su procesado y modificación para que su código sea accesible para MATLAB como se explicará en el apartado 7.2.1.



5.- ARDUINO

Arduino es una plataforma de electrónica abierta para la creación de prototipos basada en software y hardware flexibles y fáciles de usar. Se creó para artistas, diseñadores, aficionados y cualquiera interesado en crear entornos u objetos interactivos [1].

Para este proyecto se hará uso de la placa Arduino Uno R3 a la que se le acoplará una Shield, que no es más que otra placa situada sobre la placa Arduino y conectada a ella, extendiendo sus funcionalidades. Para usarla tan solo hay que incluir las librerías correspondientes, que en este caso al ser de código abierto, se obtienen con facilidad. Estas placas se pueden apilar una encima de otra, consiguiendo con cada una de ellas que la placa Arduino original adquiera una nueva capacidad añadiendo por ejemplo una shield Ethernet, conectividad bluetooth, WiFi, MP3, etc. El requisito indispensable para apilarlas es conocer el uso que cada una de ellas hace de los pines de entrada/salida de Arduino.

La elección de estas dos placas se debió a varios factores. Lo que se buscaba era un conjunto completamente compatible para poder usarlo con las instrucciones generadas por MATLAB (MATrix LABoratory) . Por otro lado todos los componentes deberían abaratar lo máximo posible el proyecto y por otro había que analizar los requerimientos necesarios que exigía nuestro proyecto.

Los puertos de entrada y salida que nos ofrecía Arduino Uno R3 eran más que suficiente. Algunos permitían PWM, existía un paquete de compatibilidad con MATLAB y sobretodo su precio hicieron que fuera la placa elegida frente al resto. La placa Adafruit se seleccionó entre las distintas shields que se ofrecían para motores paso a paso principalmente por sus librerías y por la compatibilidad con el paquete de entrada-salida Arduino ("ArduinoIO Package") facilitado por MATLAB [14].

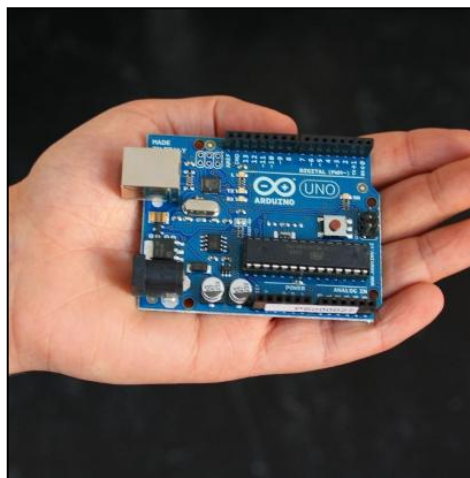


Figura 44



5.1.- ARDUINO UNO REV3

Las placas de Arduino pueden ser compradas ya montadas de fábrica o pueden ser hechas a mano al facilitarse los ficheros de diseño (CAD), ya que todo es de licencia abierta.

Esta placa está compuesta por un microcontrolador (ATmega328) programable mediante lenguaje de programación Arduino y un entorno de desarrollo Arduino. Al ser de código abierto, todo el software es accesible de manera sencilla en la propia web del fabricante.

- Tensión de funcionamiento: 5V
- Tensión de entrada (recomendada): 7-12V
- Tensión de entrada (min-max): 6-20V
- Entradas/Salidas digitales: 14 (6 de ellas proporcionan control PWM)
- Entradas analógicas: 6
- Corriente por entrada/salida: 40mA
- Corriente por pin 3.3V: 50mA
- Memoria Flash: 32KB (0.5KB usada para arranque)
- SRAM: 2KB
- EEPROM: 1KB
- Velocidad de reloj: 16MHz

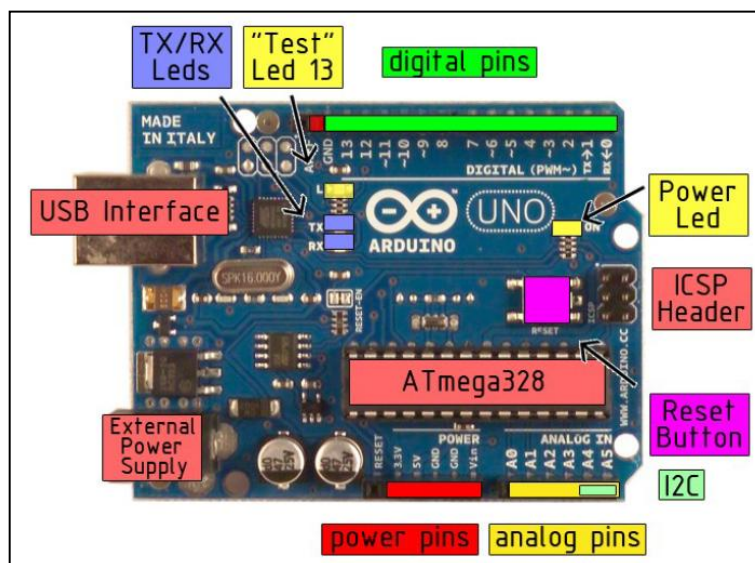


Figura 45

La programación también se puede llevar a cabo mediante interfaz gráfica con Modkit, donde se muestra en ventanas y desplegables los pines, configuración de entrada o salida, valores prefijados para esos pines, etc.



Figura 46

Sin embargo para este proyecto se hará uso del software propio de Arduino. La pantalla principal del programa y que se muestra nada más arrancarlo es la siguiente.

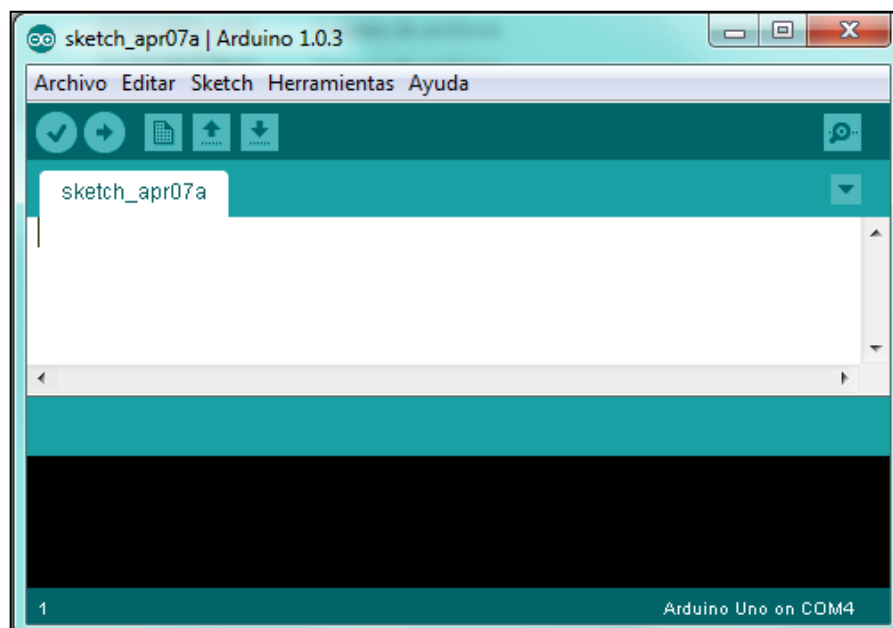


Figura 47

Pero para poder usar este software y cargar el código en la placa, el primer paso será que el ordenador reconozca la placa, por lo que se deben instalar los drivers necesarios, que son proporcionados en el mismo paquete que el software Arduino.

Para comprobar que se tiene conectividad con la placa, que se carga el código y en resumen que funciona todo correctamente, Arduino también nos facilita unos ejemplos básicos para cargar en la placa. Uno de los más sencillos es el ejemplo BLINK, encargado de hacer parpadear un LED en la placa (Archivo -> Ejemplos -> 01.Basics -> Blink).

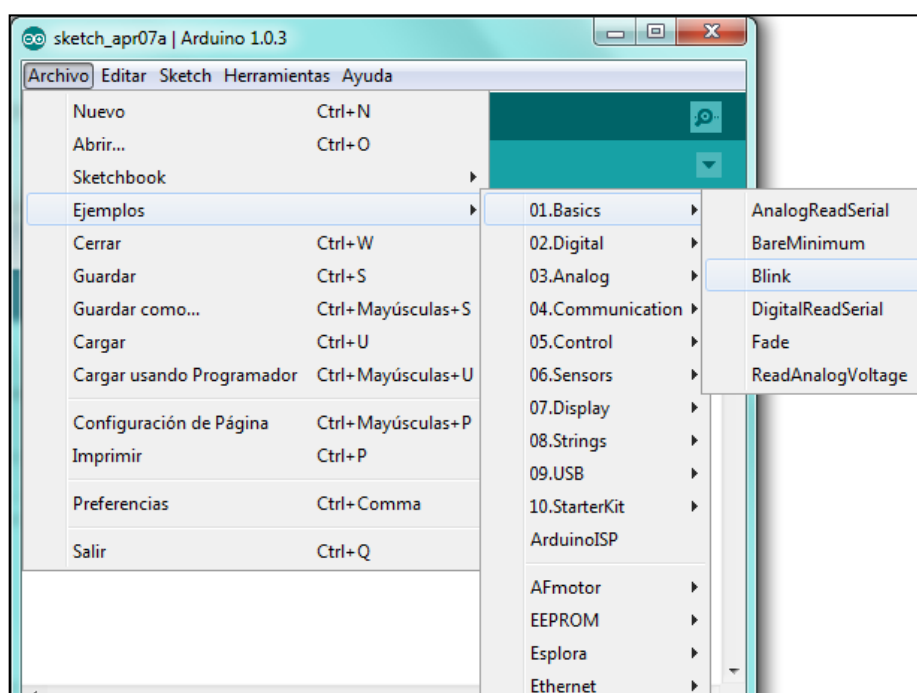


Figura 48

Una vez abierto el código del ejemplo, deberemos seleccionar el puerto COM en el que se encuentra conectada la placa y que puede variar dependiendo del ordenador (Herramientas -> Puerto Serial -> COM), así como el modelo de placa conectada que en nuestro caso se trata de Arduino UNO (Herramientas -> Tarjeta -> Arduino Uno). Ahora solo queda cargar el código en la placa mediante el botón Cargar situado en la barra superior del software. Sólo durante el proceso de carga parpadearán los Leds rotulados como TX y RX de la placa Arduino, y una vez finalizada la carga se mostrará el mensaje de carga satisfactoria en el recuadro negro inferior del software. En el caso de haber algún problema con la carga también se mostrará, especificando el código de error en la parte inferior.

Ya con el código del ejemplo BLINK cargado en la placa, deberíamos ver el LED rotulado como L parpadear. Con este paso queda comprobado el buen funcionamiento de la placa, por lo que se pasará a trabajar con la Shield de Adafruit.

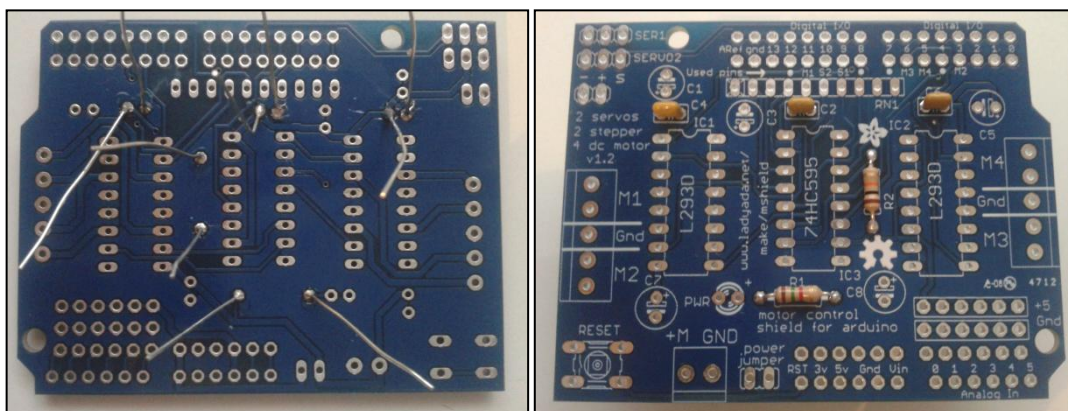
5.2.- ADAFRUIT SHIELD

Esta placa será la encargada de alimentar el motor paso a paso, alimentándose mediante una fuente externa y recibiendo las instrucciones de la placa Arduino que a su vez las recibirá de MATLAB. De este modo se controla la dirección de giro, velocidad, tipo de paso...Esta placa presenta las siguientes características:

- Conexión de 5V para 2 servomotores
- Motores DC: Hasta 4
- Motores paso a paso: Hasta 2 (unipolares o bipolares)
- Chipset: L293D. Por puente 0.6A (1.2A pico) y protección de apagado por sobrecalentamiento 4,5V - 25V
- Resistencias Pull-down mantienen los motores apagados durante el arranque
- Botón para reinicio de Arduino
- Fuentes externas: Conexión para 2 terminales

Viene sin ensamblar, por lo que hay que ayudarse de las instrucciones facilitadas en su página web para empezar a trabajar con ella [15]. En ellas se explica desde el orden de colocación de cada uno de los elementos como diferentes consejos que vendrán bien a lo largo del montaje de la placa. Hay proveedores que venden la placa directamente montada para ahorrarse el montaje, siempre pagando un sobre coste pero garantizando su funcionamiento.

Como en nuestro caso se adquirió la placa sin ensamblar, se procederá a su montaje. Primero se colocarán los componentes pasivos como son las resistencias y después los condensadores.





Tras estos componentes le llega el turno a los circuitos integrados y por último el LED testigo de alimentación de la placa. Ya se habría finalizado el montaje de todos los componentes y sólo quedarían las piezas para el conexionado de periféricos (fuentes de alimentación, motores paso a paso, etc).

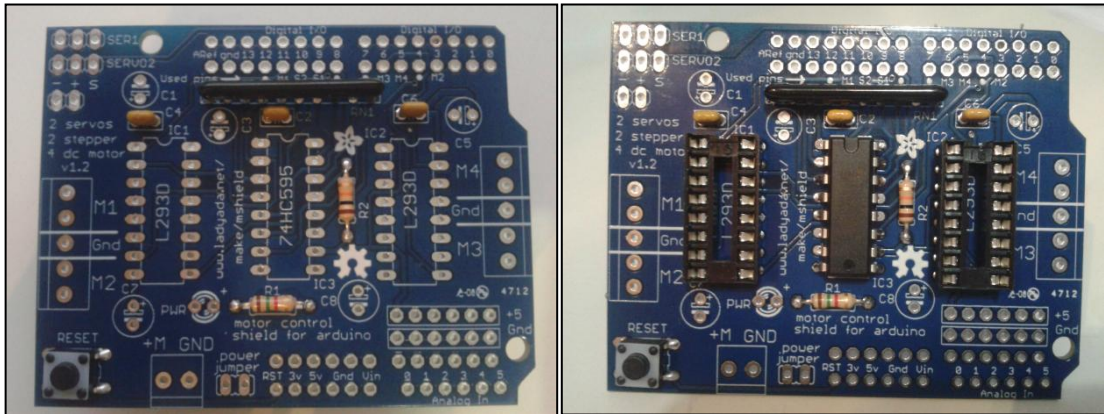


Figura 50

Una vez colocados todos los componentes y verificado que las soldaduras son correctas, se probará su conectividad y funcionamiento conectándola sobre la placa de Arduino cargando el código correspondiente en esta.

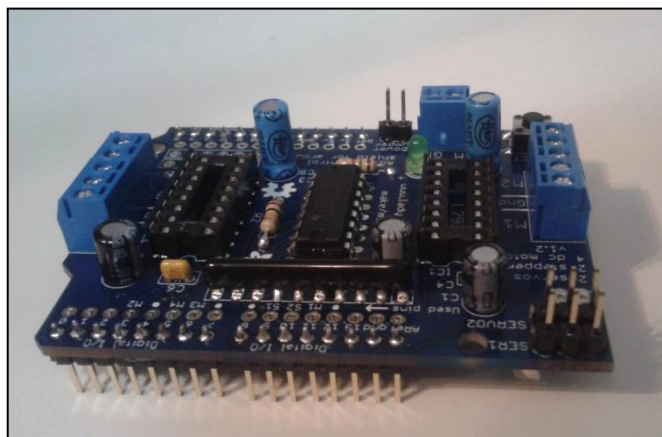


Figura 51

Para cargar el código que nos permitirá controlar los motores paso a paso conectados a esta Shield mediante MATLAB, se procederá del mismo modo que se hizo para cargar el ejemplo BLINK. Este código forma parte del paquete de soporte de MATLAB para Arduino. Además serán necesarias las librerías de Adafruit.

Como las librerías para el control de la Shield para los motores no vienen por defecto en el software de Arduino, se añadirán copiando la carpeta AFMotor (facilitada por Adafruit en su web) a su carpeta de librerías. Su ubicación destino es “arduino-1.0.3\libraries\AFmotor”. A partir de este momento se mostrarán en el desplegable de Arduino las diferentes subcarpetas que contiene el paquete de librerías de Adafruit:

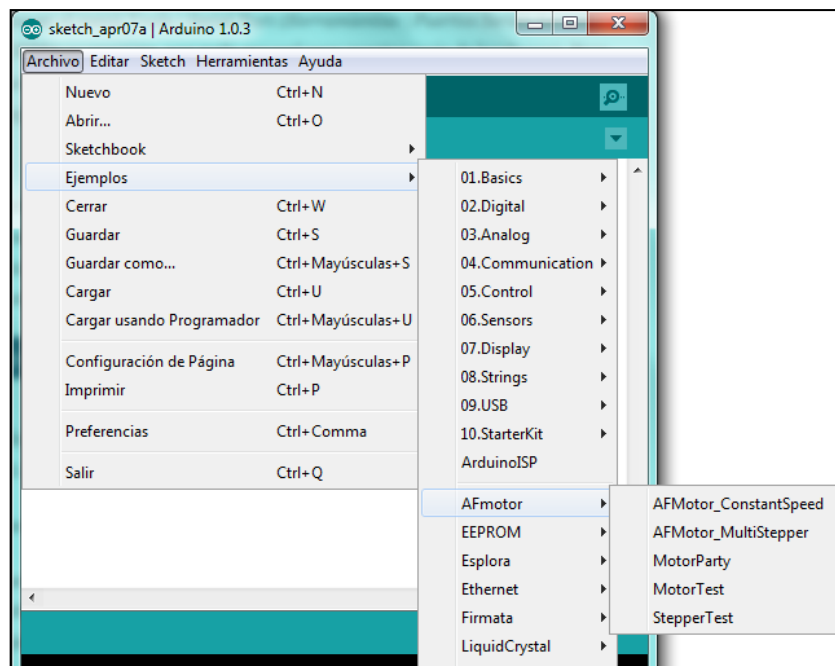


Figura 52

En el caso de que no se trabajara con MATLAB, tanto la placa de Arduino como la de Adafruit que está pinchada encima, ya estarían listas para usarse. Tan sólo habría que cargar el código con las instrucciones necesarias en Arduino. De este modo, todos los movimientos de los motores estarían previamente cargados en el código o esperando alguna señal de un hardware periférico como podrían ser interruptores, pulsadores, sensores, etc, pero no se podrían controlar mediante un software externo (MATLAB).

Como trabajaremos con MATLAB es necesario descargar el paquete llamado “ArduinoIO Package” [14]. Este paquete permite, una vez cargado en la placa Arduino el código e instalado el paquete en MATLAB, que las instrucciones generadas por MATLAB sean interpretadas y a su vez enviadas en nuestro caso a la Shield de Adrafruit. Es decir se encarga de “escuchar” continuamente las instrucciones que recibe por el puerto USB.

Hay varios códigos en el paquete encargados de “escuchar” las instrucciones de MATLAB:

- adiosrv.pde: Para funcionalidades propias de Arduino, sin shields.
- srv.pde: Para funcionalidades de Arduino con la placa de Adafruit
- motorsrv.pde: Igual que srv.pde pero no muestra el estado de los diferentes pines.



En nuestro caso se cargará el fichero `srv.pde`. Descartamos `adiosrv.pde` porque no interpretaría las instrucciones propias de la Shield Adrafruit, y `motorsrv.pde` porque no muestra el estado de los pines.

Para cargarlo seleccionamos “Menú Archivo -> Abrir -> SRV.PDE” y solo quedaría darle a cargar para guardar el código en la placa.

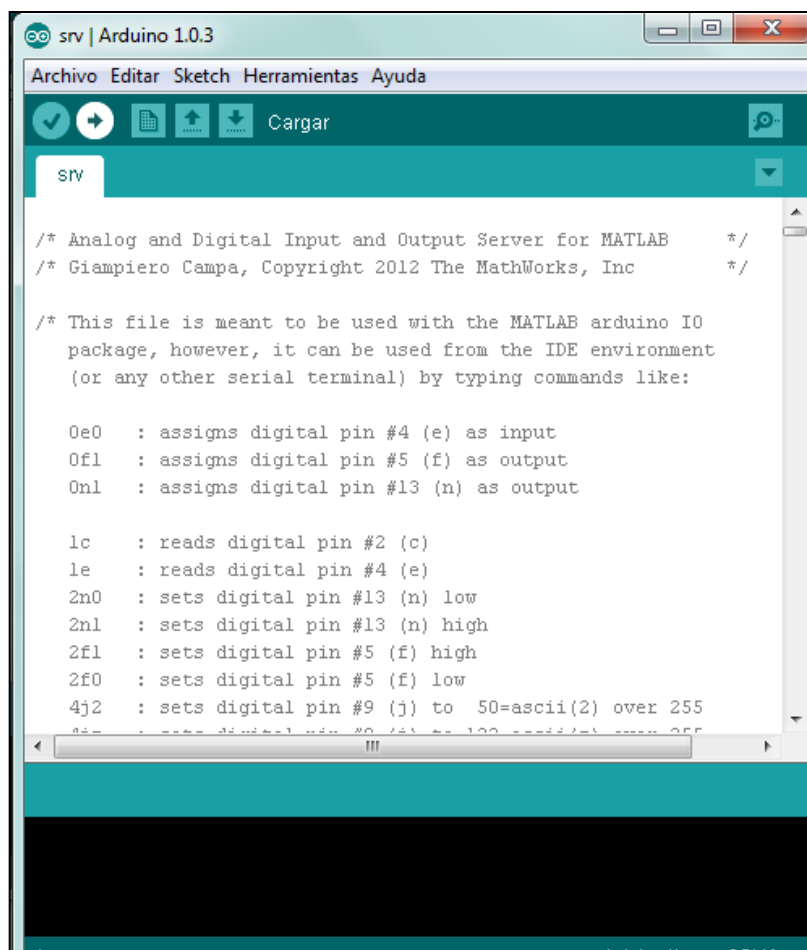


Figura 53

Una vez mostrado el mensaje de carga satisfactoria, ya tendríamos todo listo para empezar a trabajar con MATLAB.

6.- MOTOR PASO A PASO (PaP)

Para el estudio de los diodos se hará uso de un motor paso a paso, encargado de hacerlos girar angularmente mientras son caracterizados gracias al espectrómetro. A diferencia de los motores de corriente continua convencionales de dos hilos que simplemente giran al alimentarlos, estos se pueden controlar con precisión aplicando pulsos y moviéndose un paso por pulso suministrado, así como quedar clavados en una posición determinada o cambiar la dirección del giro en función de la alimentación de sus bobinas.

Dependiendo del paso de cada motor, su control será más o menos preciso, pudiendo ir desde decenas de grados hasta movimientos de diez milésimas de grados (0.0001°). Estos pasos determinarán el número de pulsos necesarios para hacer girar una vuelta completa al eje del motor. De este modo, un motor de paso $1,8^\circ$ necesitará 200 pulsos para completar los 360° . Como cabe de esperar, a mayor número de pasos, aumentará la precisión y el precio del motor.

A grandes rasgos, los motores paso a paso están compuestos por un eje imantado (rotor) que es la parte móvil, rodeado de una serie de bobinas que componen el estator que es la parte fija y que produce el campo electromagnético gracias a las bobinas para atraer a los imanes del rotor.

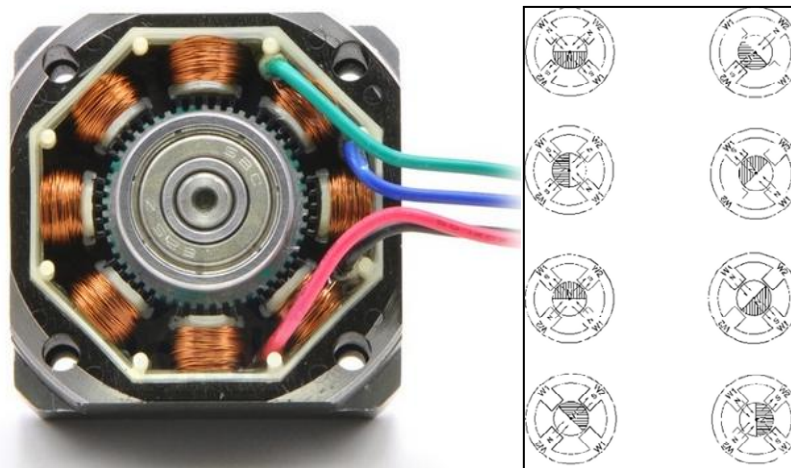


Figura 54

Dependiendo de la alimentación de las bobinas se podrán obtener movimientos suaves en la transición de un paso a otro usando PWM o movimientos bruscos si se alimenta una bobina y se corta la alimentación otra. La shield Adafruit con la que trabajaremos en este proyecto para alimentar el motor nos permite energizar de tres maneras:



- Single ("One Phase One"): En este modo, sólo una bobina está activa en cada momento, por lo que el rotor se alineará con el campo magnético que ha creado.
- Double ("Two Phase One"): Se consiguen los mismos pasos por vueltas que en single, pero se alimentan 2 bobinados cada vez, lo que hace que el rotor se sitúe alineado entre los dos polos. Se maximiza así el torque entregado.
- Interleave ("Half Step"): Combinación de los dos anteriores para doblar el número de pasos por vuelta. El rotor se alinea con un polo, luego entre polos, de nuevo a un polo, etc.

Se dividen en dos grupos, motores unipolares y motores bipolares:

- Unipolares: Se caracterizan a simple vista por tener cinco o seis cables para controlarlos. Cinco en el caso de que el cable común de las bobinas sea compartido o seis en el caso de que se use un cable común para cada bobina. Si se deja este cable común al aire su estructura pasará a ser como la de un motor bipolar. Su bobinado es doble por cada fase.
- Bipolares: Tienen cuatro cables. Sus dos bobinados correspondiendo cada uno de ellos a una fase.

Para este proyecto se empleará un motor bipolar, de 200 pasos, que funciona a 10V y 500mA. Sus dimensiones son de 35x28mm.

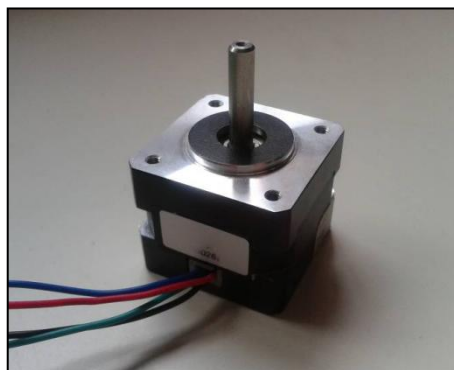


Figura 55

Para el conexionado se comprobará con el polímetro la continuidad de los pares de cables para identificar el bobinado.

7.- IMPLEMENTACION SOFTWARE

El control del motor, espectrómetro y obtención de temperatura está comando mediante MATLAB, por lo que se explicarán en este apartado las partes fundamentales para su funcionamiento. Por otro lado no hay que olvidar que para Arduino (y para el espectrómetro también) hay que realizar configuraciones de software explicadas en sus apartados.

Durante el desarrollo del proyecto se han ido introduciendo cambios y mejoras en el software así como en el interfaz de usuario, por lo que pueden encontrarse figuras que no coincidan totalmente con el interfaz final presentada.

7.1.- ASPECTO Y FUNCIONAMIENTO

El programa en MATLAB se compone de 2 ventanas creadas gracias a su herramienta GUI (Interfaz Gráfica de Usuario), pudiendo utilizar sólo una de ellas en cada momento.

Esto se debe a que una de ellas sirve principalmente para analizar el espectro de cualquier fuente de luz a tiempo real, mientras que la segunda incluye el control del motor paso a paso y sólo capturará las muestras del recorrido de 180° para después procesarlas. En función del análisis que se quiera realizar se utilizará una ventana, pudiendo pasar de uno a otra fácilmente sin necesidad de cerrar todo el interfaz de usuario. A continuación se muestran ambas.

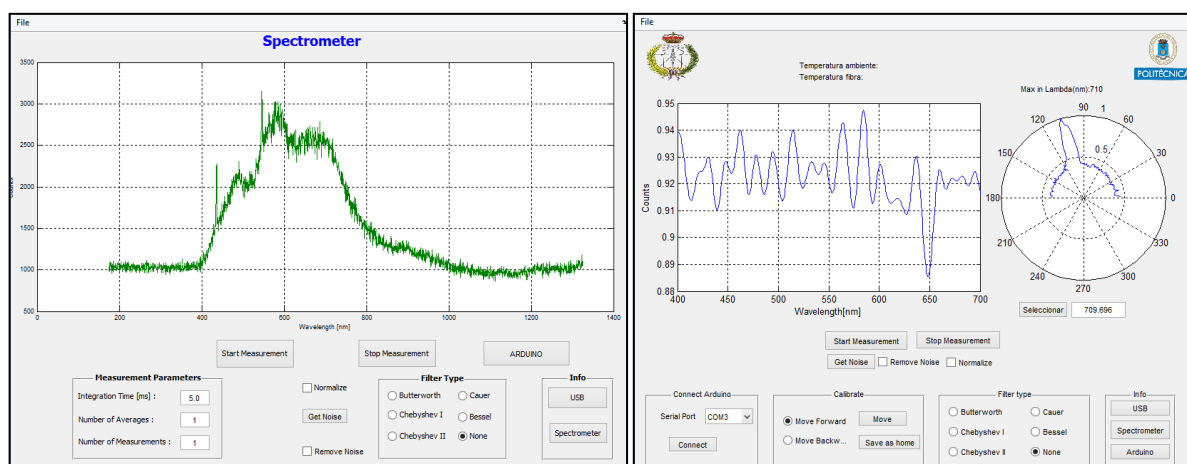


Figura 56



La inicial, mostrada en la Figura 56 es la utilizada para analizar el espectro pudiendo configurar diferentes parámetros del mismo.

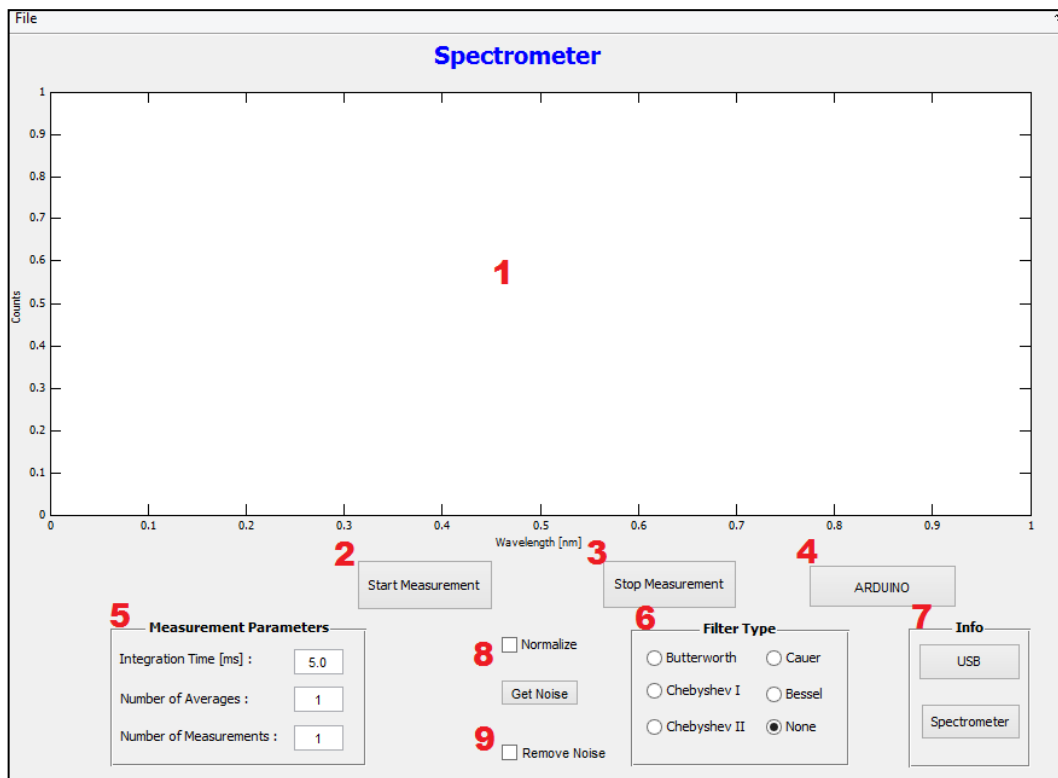


Figura 57

1. Ventana de representación del espectro.
2. Botón para iniciar las medidas.
3. Botón para detener las medidas.
4. Botón para abrir el programa de caracterización del LED (siguiente ventana).
5. Parámetros modificables del espectrómetro.
6. Tipos de filtrados aplicables al espectro.
7. Información de los periféricos.
8. Normaliza el espectro.
9. Elimina el ruido. Primero hay que capturarlo con 'Get Noise'.

Pulsando '4' - [ARDUINO] se abre la ventana de caracterización de los LEDs. Algunas funcionalidades son las mismas que la ventana anterior.

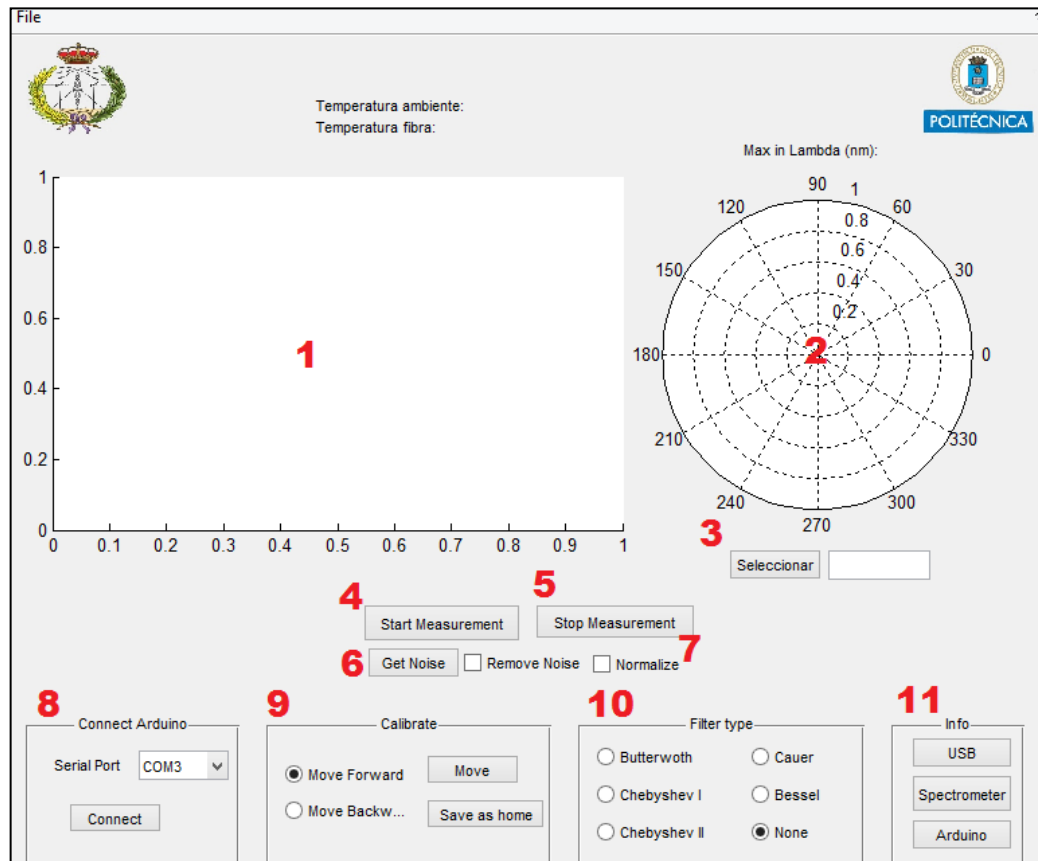


Figura 58

1. Ventana de representación del espectro.
2. Ventana de representación del diagrama de radiación.
3. Selecciona la longitud de onda a representar en '2'. Por defecto representará la que se corresponde con el máximo de intensidad del espectro capturado.
4. Botón para iniciar las medidas.
5. Botón para detener las medidas.
6. 'Get Noise' captura el ruido y marcando 'Remove Noise' se elimina del espectro
7. Normaliza el espectro.
8. Conecta con la placa Arduino seleccionando previamente su puerto COM.
9. Establece la posición inicial del motor paso a paso, pudiéndolo girar en sentido horario o anti-horario de paso en paso.
10. Tipos de filtrados aplicables al espectro.
11. Información de los periféricos.



En esta ventana, a diferencia de la primera, los parámetros de tiempo de integración, número de medias y número de medidas no son configurables, teniendo por defecto los valores de 5,1 y 1 respectivamente. Además para empezar las medidas primero hay que establecer conexión con la placa Arduino '8' y calibrar el punto de inicio '9'. Una vez hecho esto, al pulsar el botón '*Start Measurement*' se inicia la secuencia donde el motor dará un paso y el espectrómetro medirá, y así sucesivamente hasta completar los 180° donde volverá a la posición de partida y mostrará en '2' el diagrama de radiación normalizado. Una vez acabado el recorrido, automáticamente se guardará el fichero con extensión *.mat y un formato de nombre tipo "20130710T183143" (ISO 8601). Si deseamos que se guarde en formato excel, bastará con ir a "*File -> Save as*". Estos ficheros podrán abrirse posteriormente mediante "*File -> Open file*".

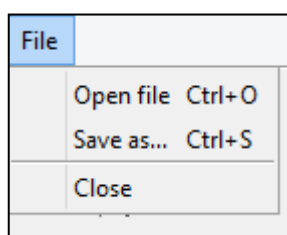


Figura 59

Cada vez que el usuario presiona cualquier botón de la GUI se genera una llamada a su función asociada, deteniendo el código que se estuviera ejecutando en ese momento. Una vez finaliza la función llamada, se vuelve a ejecutar el código en el punto que se había quedado. Se trata por tanto de un software totalmente secuencial.

7.2.- CÓDIGO

En este apartado se explicará más a fondo cada una de las funcionalidades de la GUI, su código en MATLAB y las diferentes ventanas que se muestran durante el uso del software.

7.2.1.- LIBRERIAS

Para sacarle partido al espectrómetro y principalmente para poder trabajar con sus funciones se han adquirido sus librerías, teniendo así su código y pudiendo utilizarlo según las necesidades del proyecto. Se trabajará por tanto con diferentes formatos a lo largo del proyecto como *.dll, *.cpp, *.mexw32 y *.h, además de los dos ficheros propios de MATLAB generados al trabajar con la GUI *.m y *.fig.



Para que MATLAB pueda llamar a las funciones y subrutinas de los ficheros en formato C++ (*.cpp) es necesario crear un fichero MEX (MEX-file con extensión *.mexw32) que estará ubicado en el mismo directorio donde estén los ficheros de MATLAB con formato *.m y *.fig. Todas las llamadas a las funciones de ese fichero en C realizadas en MATLAB serán ejecutadas como si se trataran de un código propio sin necesidad de incluirlo en el fichero. Se le darán unos datos de entrada y devolverá unos datos de salida que serán procesados para finalmente mostrar el espectro.

En el inicio del fichero C++ a compilar hay que incluir las siguientes cabeceras

```
#include <windows.h> Header file Windows-specific prog language
#include <math.h> Header file for programs accessing MAT-files
#include <string> Header for managing string
#include <sstream> Header for managing char type string
#include "mex.h" Header file for building C/C++ MEX-files
#include "as5216.h" Header file for spectrometer functions
#include "utility.h"
```

Como ejemplo se mostrará el código en C++ ejecutado cuando en MATLAB se lanza la instrucción de obtener el espectro

MATLAB: myData=spectrometer('getdata');

C++:

```
void OnGetData(int nlhs, mxArray *plhs[], int nrhs, const mxArray
*prhs[])
{
    int npix;
    unsigned int timelabel;
    double * data;
    DebugStringMessage("OnGetData");
    if (nrhs > 0)
        ThrowString ("wrong # of arguments - should be
'getdata'");
    npix=1+g_stoppixel-g_startpixel;
    plhs[0]=mxCreateDoubleMatrix(npix, 1, mxREAL);
    data=mxGetPr(plhs[0]);
    CheckRet(AVS_GetScopeData(g_hDevice, &timelabel, data));
}
```

Al igual que el ejemplo anterior, todas y cada una de las instrucciones en las que se interactúe con el espectrómetro mediante MATLAB harán su correspondiente llamada al código en



C++. De esta manera se puede administrar el número de procesos o instrucciones a ejecutar por el espectrómetro en cada llamada, parámetros a devolver en cada una de ellas, etc.

La inicialización de las variables se define cuando se empieza la rutina de medida del espectro. Se define cada uno de los parámetros que finalmente se introducirán en la llamada a la función "*spectrometer*"

```
S.StartPixel=0;
S.StopPixel=nPix-1;
S.IntegrationDelay=0;
S.CorDynDark=0;
S.Smoothing=0;
S.TriggerMode=0;
S.TriggerSource=0;
S.TriggerSourceType=0;
S.SaturationDetection=1;
spectrometer('measconfig',S);
```

El compilador utilizado para crear el fichero "spectrometer.mexw32" fue Microsoft Visual C++ 2010. Se deberá seleccionar en MATLAB frente al resto de compiladores instalados en el ordenador y que sean compatibles.

```
mex -setup
```

```
Please choose your compiler for building MEX-files:
```

```
Would you like mex to locate installed compilers [y]/n? y
```

```
Select a compiler:
```

```
[1] Intel C++ 12.0 (with Microsoft Visual C++ 2010 linker) in
    F:\share\apps\BuildTools\compilers\windows\IntelComposerXE-2011
[2] Intel Visual Fortran 12.0 (with Microsoft Visual C++ 2010 linker)
    in
    F:\share\apps\BuildTools\compilers\windows\IntelComposerXE-2011
[3] Microsoft Visual C++ 2010 in C:\Program Files (x86)\Microsoft
    Visual
    Studio 10.0
```

```
[0] None
```

```
Compiler: [3]
```

```
Please verify your choices:
```

```
Compiler: Microsoft Visual C++ 2010
```

```
Location: C:\Program Files (x86)\Microsoft Visual Studio 10.0
```

```
Are these correct [y]/n? y
```

Ya seleccionado el compilador se procede a la propia compilación del fichero que en nuestro caso lo llamaremos "*spectrometer*". Se generará el fichero con el mismo nombre pero con la extensión *.mexw32 como se comentaba

```
mex spectrometer.cpp
```

7.2.2.- INFORMACION PERIFERICOS

Esta caja etiquetada como INFO está situada en el margen inferior derecho de las interfaces de usuario. Nos facilita información acerca del modelo, conectividad y estado de cada uno de los periféricos conectados.

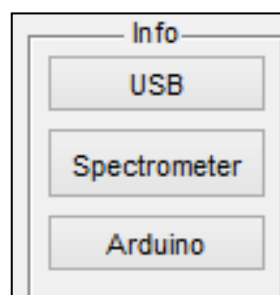


Figura 60

Aunque en la mayoría de casos una vez que el sistema operativo detecta correctamente el periférico en MATLAB no hay problemas, se puede dar la situación que estando conectado correctamente no se llegue a establecer conexión con el periférico mediante MATLAB, por lo que durante el desarrollo nos ayudará a detectar si el error está en nuestro código o en el conexionado. A continuación se ofrece el código implementado en cada caso.

- USB

Gracias a las librerías del espectrómetro, pulsando sobre este botón se nos facilita la información del correcto funcionamiento del USB mostrándose la tensión a la que está trabajando.

```
analog=spectrometer('getanalogin',3);  
msgbox(sprintf('Analog Input #3 (USB voltage): %5.3f V',analog))
```



Figura 61

- Espectrómetro

Nos facilita la versión del propio espectrómetro Avantes, de las librerías usadas y de algunas de sus características como el número de píxeles.

```
ver=spectrometer('getversion');  
nPix=spectrometer('getnumpixels') ;  
msgbox(sprintf('Friendly name: %s\nSensortype: %d\nNumber of  
pixels: %d\nDll version: %s', P.FriendlyName, P.SensorType, nPix, ver.dll), 'Spectrometer  
Info')
```

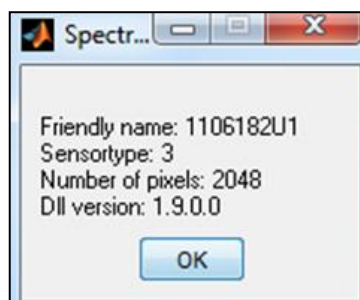


Figura 62

- Arduino

Proporciona las características de la placa Arduino utilizada, de la placa situada encima para controlar el motor paso a paso y del propio motor. Realmente no verifica si la placa está conectada correctamente ya que para ello previamente hay que seleccionar el puerto COM y pulsar sobre conectar, es decir no es detectada automáticamente por MATLAB.

```
msgbox(sprintf('Placa Arduino Uno \nArduino Shield: Adafruit v1.1  
\nStepper Motor: Bipolar 10V, 500mA, 200steps/rev \nSerial Port:  
%s', COM) )
```



7.2.3.- TEMPERATURA

Durante la realización de las medidas, gracias a los circuitos integrados LM35 estará monitorizada la temperatura ambiente así como la temperatura a la altura del conector SMA que sostiene la fibra óptica. Con esto se intentará observar variaciones de temperatura posiblemente ocasionadas y emitidas junto al haz del diodo y cómo afectaría esto al espectro.

```
temperatural = round(((5.0 * Motor.analogRead(3) *  
100.0)/1024.0));  
temperatura2 = round(((5.0 * Motor.analogRead(5) *  
100.0)/1024.0));  
temperatural=strcat('Temperatura  
ambiente:', num2str(temperatural), '°C');  
temperatura2=strcat('Temperatura  
fibra:', num2str(temperatura2), '°C');  
set(handles.text6, 'String', temperatural);  
set(handles.text7, 'String', temperatura2);
```

7.2.4.- FILTRADO

Facilita el reconocimiento de la señal disminuyendo las fluctuaciones del ruido y por tanto limpiando el espectro de modo que los puntos significativos sean reconocibles. Para ello el filtro permite el paso de las componentes de la señal existentes en un determinado intervalo de frecuencias y elimina las componentes pertenecientes a otro intervalo.

- Banda de paso: intervalo de frecuencias a conservar.
- Banda atenuada: intervalo de frecuencias que se eliminan
- Banda de transición: situada entre las dos anteriores

Algunos de los parámetros que caracterizan al filtro:

- Frecuencia de atenuación: frecuencia extremo banda atenuada.
- Frecuencia de corte: delimita la banda de paso.
- Rizado: fluctuaciones presentes en la atenuación de una banda.

Se pueden hacer varias clasificaciones de los filtros. Una de ellas es atendiendo a su respuesta en frecuencia. Así encontraremos filtros paso bajo, paso alto, paso banda y banda eliminada. Pero también se pueden clasificar según el método de diseño, encontrándonos con los filtros implementados en esta GUI. Por defecto la opción de filtrado selecciona será *None*, alguna de las características de cada filtro:



- **Butterworth**: respuesta plana con mínimo rizado deja pasar componentes frecuenciales lo más planas posibles.
- **Chebyshev I**: rizado constante en la banda de paso. La frecuencia de corte no depende del orden.
- **Chebyshev II**: rizado constante en la banda de rechazo
- **Cauer** (elíptico): banda de transición estrecha consiguiendo menor orden para las mismas condiciones que el resto.
- **Bessel**: banda de transición mayor. No distorsiona las señales al tener una fase lineal en las bandas de paso.

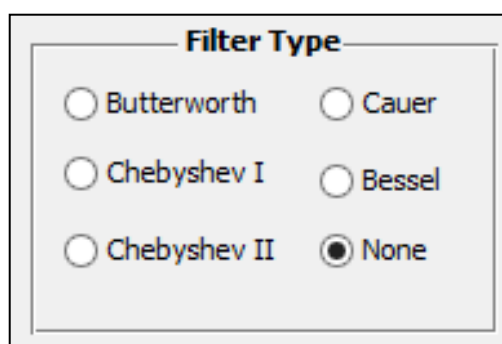


Figura 63

Entre los tipos de filtros digitales, FIR (Respuesta Finita al impulso) e IIR (Respuesta Infinita al Impulso), para este proyecto se utilizarán los IIR al necesitar un menor orden para las mismas condiciones disminuyendo el gasto computacional. Además serán paso bajo para eliminar el rizado en la señal de entrada.

Uno de los parámetros utilizado para definir los filtros es la función de transferencia

$$H(Z) = \frac{B(Z)}{A(Z)}$$

Esta función define el comportamiento del filtro y determina el cambio producido en la señal de entrada en su amplitud y fase al atravesarlo. Por otro lado el orden definirá la atenuación producida en cada banda.

El esquema general que se utiliza para todos los filtros es obtener primero los coeficientes de cada uno de ellos e introducirlos a la señal captada:

```
[b,a] = butter(n,Wn);  
myData=filtfilt(b,a,myData);
```


Siendo 'A' y 'B' los coeficientes del filtro digital y 'señal' el array de 2048 intensidades de cada captura del espectrómetro. Estas funciones están implementadas en el bucle de medida del espectrómetro, mientras que si se selecciona otro tipo de filtro se hace una llamada a su función para cambiar los coeficientes 'A' y 'B'. La función `filtfilt` filtra los datos del vector 'señal' dos veces con el filtro descrito por los vectores 'A' y 'B', en ambas direcciones, evitando así la distorsión de la fase característica de los filtros IIR.

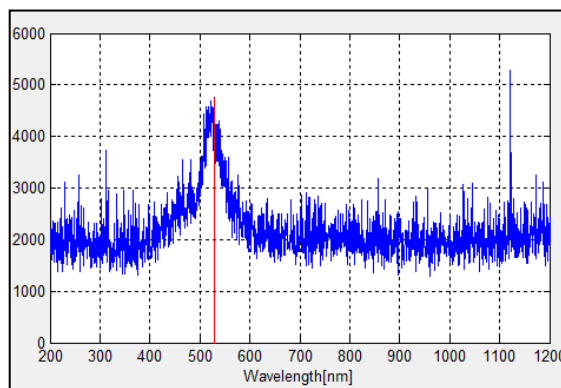


Figura 64

La Figura 63 se corresponde al espectro capturado para un LED verde de baja intensidad sin ningún tipo de tratamiento de la señal. Al tener un pico de intensidad cerca de 1100nm, los ejes de MATLAB se ajustan haciendo que el espectro deseado no se muestre limpiamente. Aplicando algunos de los filtros anteriores mediante los coeficientes se obtienen los espectros siguientes correspondientes a Butterworth y ChebyshevII.

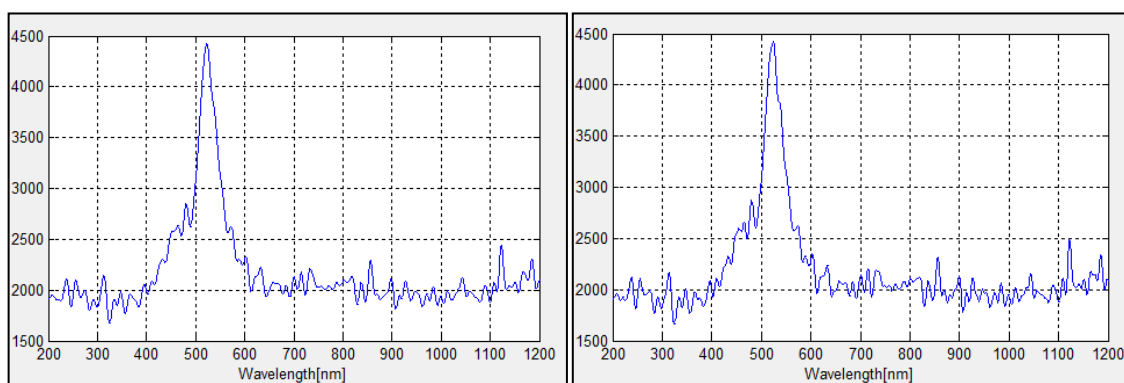


Figura 65

```
if (hObject==handles.Butterworth)
    [n,Wn] = buttord(Wp,Ws,Rp,Rs);
    [b,a] = butter(n,Wn);
    filter=true;
```



```
elseif(hObject==handles.Chebyshev_I)
    [n,Wn] = cheblord(Wp,Ws,Rp,Rs);
    [b,a] = cheby1(n,Rs,Wn);
    filter=true;
elseif(hObject==handles.Chebyshev_II)
    [n,Wn] = cheb2ord(Wp,Ws,Rp,Rs);
    [b,a] = cheby2(n,Rs,Wst);
    filter=true;
elseif(hObject==handles.Cauer)
    [n,Wn] = ellipord(Wp,Ws,Rp,Rs);
    [b,a] = ellip(n,Rp,Rs,Wp);
    filter=true;
elseif(hObject==handles.Bessel)
    [b,a] = besself(n,Wo);
    filter=true;
elseif(hObject==handles.None)
    clear b;
    clear a;
    filter=false;

else
```

7.2.5.- CALIBRACION

Este proceso se tendrá que llevar a cabo siempre que el motor paso a paso haya recibido algún movimiento en su eje no hecho mediante MATLAB, o si ha sido desmontado el motor de la placa. Se fijará así la posición de partida del recorrido de 180°, obteniendo un diagrama de radiación preciso, con los máximos y mínimos en sus ángulos correspondientes.

Para la calibración se seleccionará la dirección de movimiento y por cada pulso al botón *"Move"* se realizará un único paso (recordemos que para este motor cada paso es de 1,8°).

```
Direction='forward';
Direction='backward';
Motor.stepperSpeed(1,2);
Motor.stepperStep(1,Direction,'single',1);
```

Una vez en su posición correcta, se pulsará *"Save as home"*, siendo válida esta calibración en todo momento a excepción de los casos nombrados anteriormente.

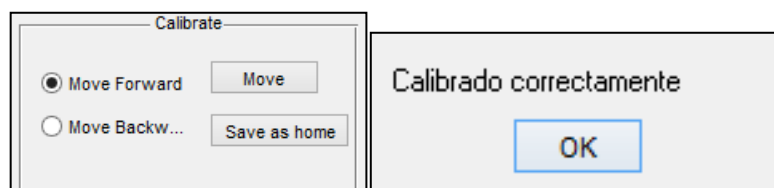


Figura 66



```

if stoploop2==false
    msgbox('Acabe de caracterizar para calibrar');
else
    MotorPosition=0;
    msgbox('Calibrado correctamente');
end

```

7.2.6.- CONEXION ARDUINO

Como los números de los puertos varían para cada ordenador, no se puede definir uno único por defecto por lo que se necesita especificar el puerto COM al que está conectado la placa. Esta selección se hará mediante el menú desplegable, que inicialmente tendrá seleccionado el COM3.

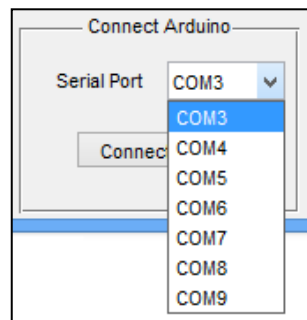


Figura 67

```

COM=(get(hObject,'Value')) ;

switch COM
case 1
    COM='COM3';
case 2
    COM='COM4';
case 3
    COM='COM5';
case 4
    COM='COM6';
case 5
    COM='COM7';
case 6
    COM='COM8';
case 7
    COM='COM9';
end

```



Con el puerto seleccionado, tras pulsar el botón "*Connect*" se mostrará una ventana durante la conexión.

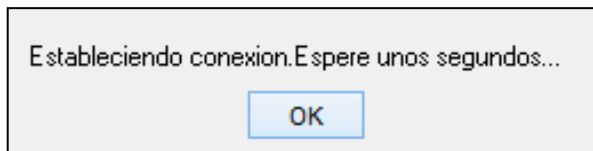


Figura 68

```
h=msgbox('Estableciendo conexion.Espere unos segundos...','Espere');  
Motor=arduino(COM);  
delete(h)
```

En el caso que el puerto sea el correcto, se abrirá una ventana indicándolo y la conexión habrá finalizado, pudiendo ya mandar instrucciones a la placa.

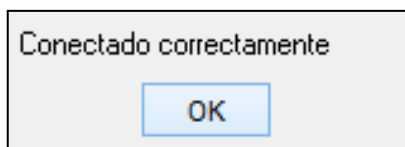


Figura 69

En el resto de casos, bien porque el puerto seleccionado no sea el correcto o porque aún siéndolo este no responde se mostrará esta otra ventana.

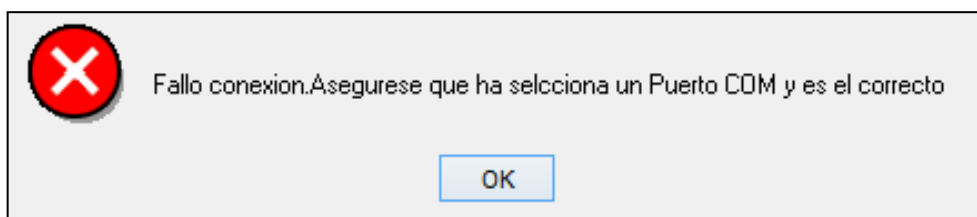


Figura 70

```
if isempty(Motor)  
    h=msgbox('Fallo conexion.Asegurese que ha selcciona un Puerto COM y es el correcto','Error','error')  
    return;  
else  
    msgbox('Conectado correctamente','Conectado');  
end
```

7.2.7.- NORMALIZACION

Junto con el filtrado, esta funcionalidad facilita la diferenciación y comparación de los espectros medidos. Este tratamiento de la señal captada divide todas las intensidades medidas entre el valor máximo del vector compuesto por 2048 intensidades. Por tanto el valor máximo al normalizar se corresponderá a la unidad, siendo el resto de valores inferiores a este valor.

$$Señal = \frac{Señal}{\max(señal)}$$

La disposición de la casilla 'Normalize' difiere entre las dos interfaces de usuario. Mientras que en la primera ventana se sitúa debajo y entre los botones de 'Start Measurement/Stop Measurement', en la segunda lo hace justo debajo del botón 'Stop Measurement'.

Ventana1:

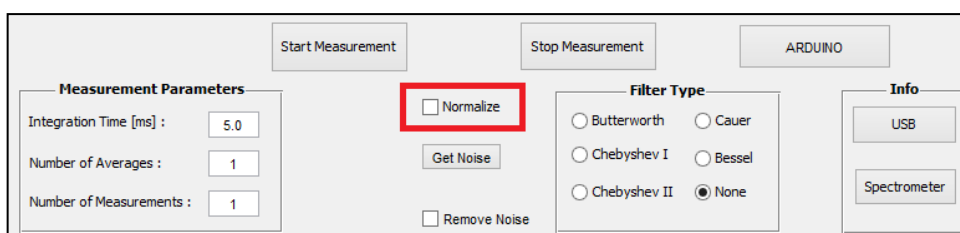


Figura 71

Ventana2:

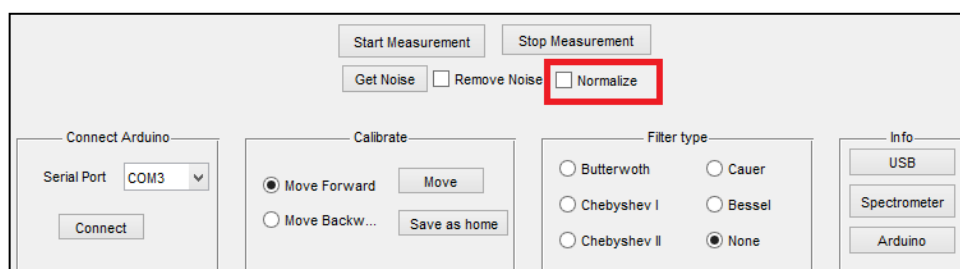


Figura 72

Esta normalización se puede elegir independientemente de que esté o no seleccionado cualquier filtro.

En la segunda interfaz donde se caracteriza el LED, la normalización afectará sólo a la ventana izquierda del GUI ya que el diagrama de radiación aparecerá siempre normalizado,

aún no estando seleccionada esta casilla. A continuación se muestra el mismo espectro sin normalizar y normalizado.

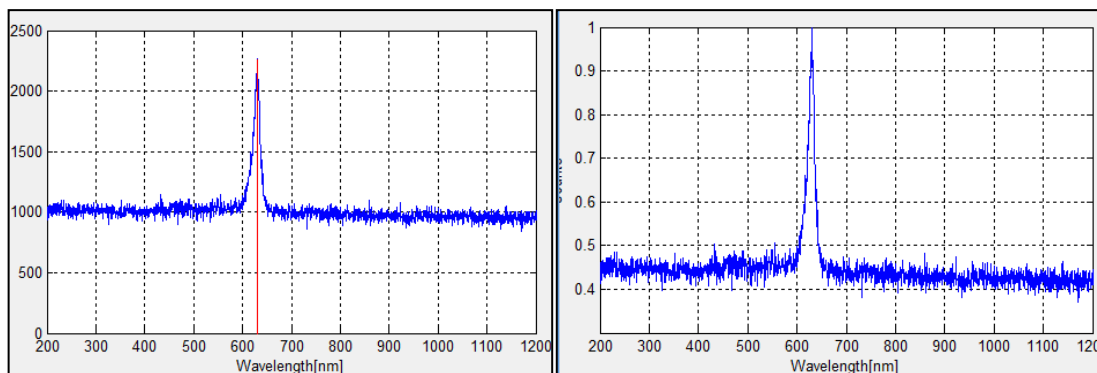


Figura 73

7.2.8.- RELACION SEÑAL RUIDO

En este apartado se explicará la importancia del ruido sobre el espectro, que produce que la medición de fuentes lumínicas de poca intensidad pasen totalmente desapercibidas en las capturas.

Suponiendo por ejemplo que las mediciones se lleven a cabo en un lugar con luz solar o cualquier otro tipo de fuente de luz que no sea la fuente a medir, el espectrómetro (inicialmente con la fuente a medir apagada) capturaría una serie de intensidades que se sumarían al espectro capturado al encender la fuente. Todas esas intensidades serían ruido que están perturbando el espectro característico de nuestra fuente.

Es por ello que si la intensidad de nuestra fuente de luz no es suficientemente alta como para destacar entre el resto de intensidades, pueda llegar a pasar desapercibida a nuestros ojos al ver el espectro, haciendo completamente indispensable eliminar todo ese ruido.

Una de las formas para disminuir ese ruido es sincronizar el encendido de la fuente de luz con la captura del espectro. En este proyecto como las fuentes de luz a medir frente al ruido tienen niveles mucho más elevados se ha optado por la eliminación de ese ruido capturándolo justo antes de empezar cada medida obteniendo muy buenos resultados.

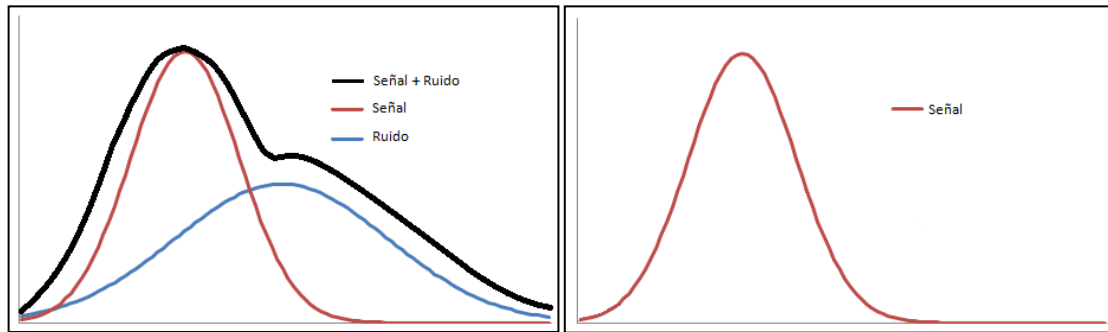


Figura 74

En nuestro caso el ruido era producido únicamente por la luz solar, ya que las fuentes de luz del laboratorio como fluorescentes fueron apagadas. La luz solar al variar muy lentamente justificaba su captura instantes antes de las mediciones, conociendo por tanto el espectro de ruido. Restando este ruido a las intensidades capturadas en cada momento por el espectrómetro, se obtiene un espectro prácticamente libre de perturbaciones externas.

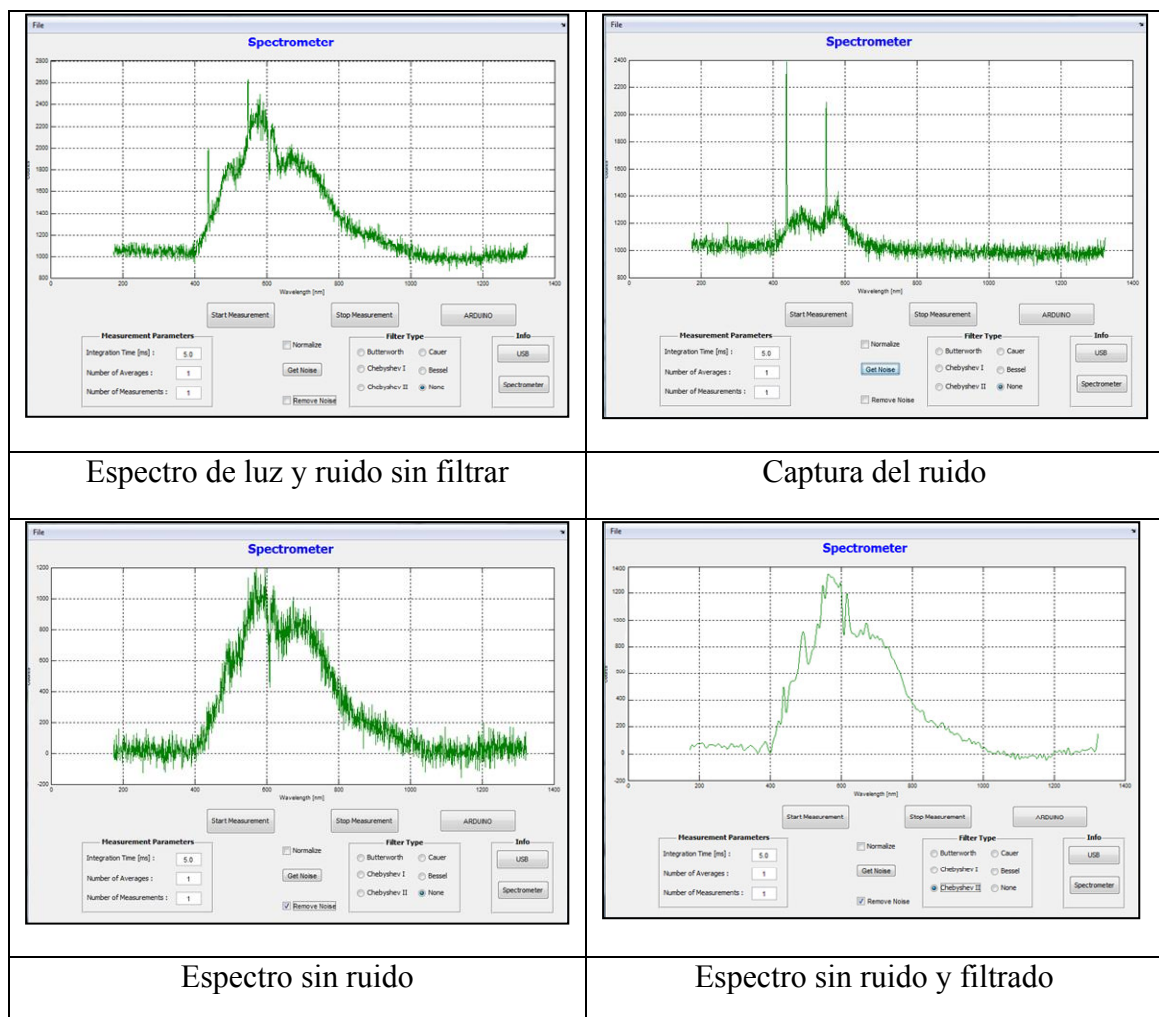


Figura 75



Al igual que en el apartado de normalización, en este la ubicación de los botones para ambas interfaces aunque similar, no es el mismo.

Ventana1:

Figura 76

Ventana2:

Figura 77

En el caso que seleccionemos la casilla "Remove Noise" sin haber primero capturado el espectro del ruido, se mostrará un error.

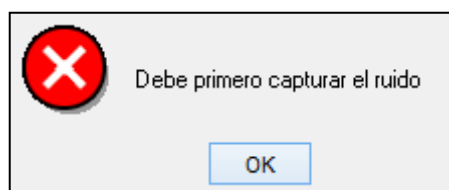


Figura 78

Una vez capturado el ruido con "Get Noise", será el propio usuario el que decida cuando restarlo a la señal capturada, seleccionando "Remove Noise":

$$\text{señal} = (\text{señal}) - (\text{señal}_{\text{ruido}})$$



```
myLambdaNoise=spectrometer('getlambda');  
spectrometer('measconfig',S);  
spectrometer('measure',1);  
myDataNoise=spectrometer('getdata');  
NoiseData=true;  
if RemoveNoise==true & NoiseData==true  
    myData=myData-myDataNoise;  
elseif RemoveNoise==true & NoiseData==false  
    uiwait(msgbox('Debe primero capturar el ruido'));  
    set(handles.Remove_Noise,'Value',0);  
    RemoveNoise=false;  
end
```

Para que la eliminación del ruido se haga de manera correcta, la configuración del espectrómetro (tiempo de integración, número de muestras, etc) no puede cambiar entre la captura del ruido y la eliminación del mismo al espectro medido. Esto es debido a que cualquier medida con, por ejemplo, un tiempo de integración mayor, obtendrá intensidades superiores que si en las mismas condiciones ese tiempo es inferior. Este problema no se puede dar en la GUI del diagrama de radiación (ventana2) ya que estos parámetros no son configurables, como ya se comentó con anterioridad.

Cabe destacar que si bien la eliminación del ruido en cualquier señal facilita su interpretación, en nuestro caso no es tan notable, ya que la intensidad de los LEDs es suficientemente elevada como para que sea apreciado su espectro frente al resto de fuentes lumínicas con intensidad muchísimo menores. Esto unido a una pieza en forma de túnel que sesituará sobre la placa, hace que la eliminación del ruido en este caso no sea estrictamente necesaria, pudiendo medir los LEDs sin necesidad de su eliminación. El suelo de ruido presente en todas las muestras disminuye por tanto al usar esta funcionalidad.

7.2.9.- INICIO / FIN DE MEDIDAS

La rutina que se ejecuta al pulsar "*Start measurement*" no es la misma en las 2 ventanas de GUI, aunque comparten gran parte del código.

En los siguientes diagramas de flujo se explica su funcionamiento donde se pueden apreciar las diferencias entre uno y otro.

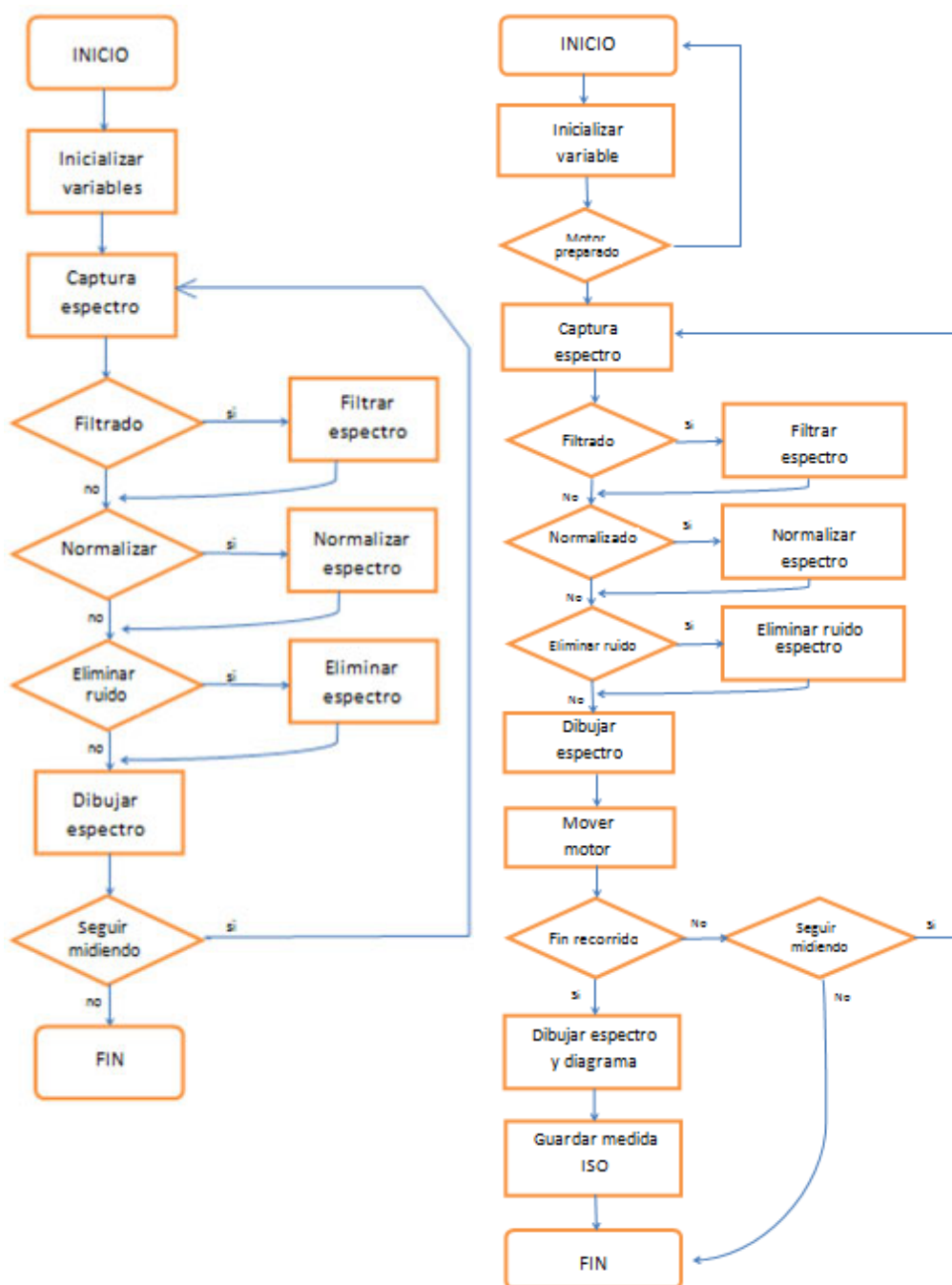


Figura 79

Mediante las llamadas a las funciones explicadas con anterioridad, se consigue la representación según la configuración elegida en cada momento por el usuario.



1. Ventana 1 GUI

El único periférico a configurar antes de iniciar las medidas es el espectrómetro. Mediante los textos editables de la caja "*Measurements parameters*" se configuran los valores para que la captura de intensidades del espectrómetro se haga de un modo u otro.

```
Measnum=str2num(get(hObject,'String')); -> Por defecto 1
S.NrAverages=str2num(get(hObject,'String'));
inttimestring=strrep(get(hObject,'String'),',','.');
set(hObject,'String',inttimestring)
S.IntegrationTime=str2double(inttimestring); -> Por defecto 1
```

Una vez con todos los valores guardados al pulsar "*Start Measurement*" el espectrómetro estará midiendo hasta que se pulse "*Stop Measurement*". Durante la medición se puede normalizar la señal, eliminar el ruido y/o filtrar sin necesidad de pararlo.

```
while (stoploop==false)
    myLambda=spectrometer('getlambda');
    spectrometer('measconfig',S);
    spectrometer('measure',1);
    myData=spectrometer('getdata');
    mySat=spectrometer('getsaturated');
    plot(myLambda,myData,myLambda,mySat);
    grid on;
    xlabel('Wavelength [nm]');
    ylabel('Counts');
    pause(0.2)
end
```

Con esta interfaz podemos abrir la segunda ventana del GUI pulsando sobre "*Arduino*"

2. Ventana 2 GUI

Se caracteriza principalmente porque una vez pulsado el botón de inicio de medidas (si todos los periféricos están correctamente conectados e inicializados) hace girar 180° el eje del motor paso a paso que soporta al LED caracterizándolo en dos figuras con su espectro a la izquierda y su diagrama de radiación a la derecha. En esta interfaz los parámetros configurables del espectrómetro desaparecen, manteniéndose la capacidad de normalización y filtrado y pudiendo elegir la frecuencia a representar en el diagrama de radiación.

```
myLambda=spectrometer('getlambda');
todo=myLambda;
while (stoploop2==false)
```



```
myData=spectrometer('getdata');
todo=[todo,myData];
plot(handles.axes2,myLambda,myData);grid on;
axes(handles.axes2)
xlabel('Wavelength[nm]');
xlim([200 1200]);
Motor.stepperStep(1,MotorDir,'single',1)
if strcmp(MotorDir,'forward')
    MotorPosition=MotorPosition+1
elseif strcmp(MotorDir,'backward')
    MotorPosition=MotorPosition-1;
end
if MotorPosition>=100
    stoploop2=true;
end
end
reloj=clock;
reloj=datestr(reloj,30);
save(reloj,'todo');
Motor.stepperStep(1,'backward','single',MotorPosition)
MotorPosition=0;
[MaxValue,MaxPosition]=max(todo(379:1434,2));
MaxPosition=MaxPosition+378; set(handles.text5,'String',
strcat('Max in
Lambda (nm): ',num2str(round(todo(MaxPosition,1)))));
set(handles.LambdaSelected,'String',num2str((todo(MaxPosition,1)
))));
axes(handles.axes2);
xlim([200 1200]);
hold on;
plot([todo(MaxPosition) todo(MaxPosition)],[0
MaxValue],'r');
hold off;
PolarData=todo(MaxPosition,2:101);
MaxPolarData=max(PolarData);
PolarData=PolarData/MaxPolarData;
polar(handles.axes3,Polar,PolarData);grid on;
end
```

7.2.10.- OPEN FILE / SAVE AS

Como no siempre se va a poder trabajar con los equipos de medida, se hace necesario guardar los resultados obtenidos en tablas, pudiéndose abrir en todo momento por el usuario. En ambas interfaces, pulsando en el botón "File" de la esquina superior izquierda se abre un menú desplegable con las diferentes opciones

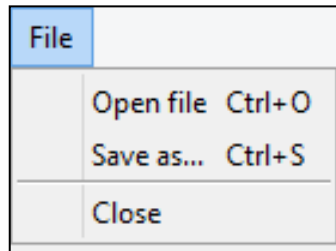


Figura 80

En la primera ventana donde sólo medimos el espectro en un momento dado, se trabajará por defecto con ficheros en formato excel *.xls, ya que la tabla está compuesta únicamente por dos columnas de 2048 filas cada una (una de longitudes de onda y otra de intensidades).

```
[FileName, PathName]=uigetfile('*.xls','Select excel file');
Path=strcat(PathName, FileName);
if isempty(Path)
    return;
end
myLambda=xlsread(Path, 'medida');
myData=myLambda(:,2);
myLambda=myLambda(:,1);
plot(myLambda,myData,myLambda,myData);
grid on
xlabel('Wavelength [nm]');
ylabel('Counts');
```

En la segunda interfaz de usuario (Arduino), el formato de fichero por defecto es *.mat debido a que su peso para tablas con muchos datos es muy inferior al resto de formatos. En concreto para cada caracterización se generará una tabla con 101 columnas de 2048 filas cada una, la primera columna de longitudes de onda y las otras 100 de intensidades para cada paso del motor. Aún así, como es posible que el usuario quiera consultar o trabajar con los datos obtenidos en un ordenador sin MatLab, se tiene la posibilidad de guardar el fichero en formato excel pulsando sobre "Save as..." mostrándose la Figura 80.

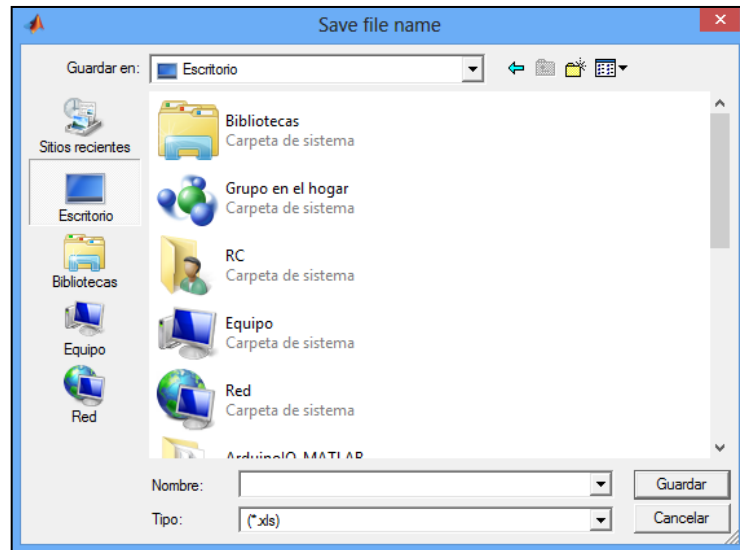


Figura 81

El código ejecutado al abrir un fichero es el siguiente:

```
[FileName,PathName]=uigetfile('*.mat','Select excel file');
Path=strcat(PathName, FileName);
if isempty(Path)
    return;
end
load(Path);
Polar=[1];
for i=2:100
    Polar=[Polar,i];
end
Polar=Polar*2*pi/200;
myLambda=todo(:,1);
myData=todo(:,2);
plot(handles.axes2,myLambda,myData);grid on;
[MaxValue,MaxPosition]=max(todo(379:1434,2));
MaxPosition=MaxPosition+378;
set(handles.text5, 'String', strcat('Max in
Lambda (nm) : ',num2str(round(todo(MaxPosition,1)))));
set(handles.LambdaSelected, 'String', num2str((todo(MaxPosition,1)
)));
axes(handles.axes2);
xlabel('Wavelength[nm]');
ylabel('Counts');
xlim([400 700]);
hold on;
plot([todo(MaxPosition) todo(MaxPosition)],[0 MaxValue], 'r');
hold off;
PolarData=todo(MaxPosition,2:101);
MaxPolarData=max(PolarData);
PolarData=PolarData/MaxPolarData;
polar(handles.axes3,Polar,PolarData);grid on;
```

En ambas interfaces, en el caso de que se intenten guardar las medidas sin haber capturado nada con el espectrómetro, se abrirá una ventana indicándolo:

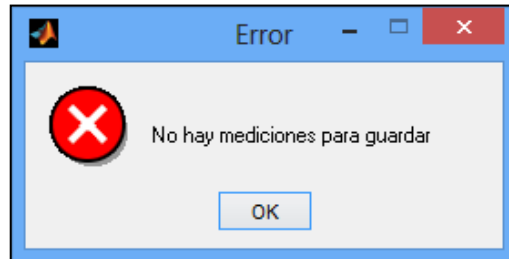


Figura 82

El código implementando para la consulta de si la tabla de medidas tiene muestras y que se muestre el error es el siguiente.

```
if isempty(myLambda)
    msgbox('No hay mediciones que guardar','Error','error');
else
    Getspectra=true;
    [FileName2,PathName2]=uiputfile('*.xls','Save file name');
    DirSave=strcat(PathName2, FileName2);
end
```




8.- DESARROLLO PRÁCTICO Y MEDIDAS

Uno de los objetivos del proyecto es caracterizar espectralmente una serie de LEDs, por lo que para ello serán necesarios una serie de elementos, algunos ya definidos y explicados con anterioridad:

- Espectrómetro.
- LEDs.
- Controladores (Drivers).
- Fuente de alimentación.

Tan importantes como estos dispositivos son los diferentes cables para el conexionado de los aparatos o medición, como pueden ser coaxiales, fibra óptica, etc.

Las medidas se han llevado a cabo en el laboratorio de óptica de la EUITT, haciendo uso del material facilitado por el Departamento de Ingeniería Audiovisual y Comunicaciones (DIAC).

8.1- LEDs ADQUIRIDOS

Entre los materiales adquiridos para la realización del proyecto están los cinco tipos de LEDs a estudiar. La elección de estos no fue de forma aleatoria si no que se buscó que trabajaran en una zona diferente del espectro, de modo que se pudiera estudiar una parte más amplia del mismo en lugar de centrarnos en un único rango de poca anchura espectral. Entre los diferentes tipos disponibles se descartaron aquellos LEDs que no eran de alta potencia, de montaje superficial, etc. Una vez hecho un filtro global y teniendo ya menos candidatos, se descartaron LEDs con un precio elevado y aquellos que no se pudieran elegir del mismo tipo para el rango de frecuencias que buscábamos. Finalmente encontramos los siguientes, que se ajustaban a las características que se buscaban inicialmente, con un coste que no era elevado y pudiendo conseguir el mismo tipo de LED (montaje, potencia similar, óptica, etc) y con parecidas características para las diferentes longitudes de onda.

- LED IR 940nm 460mW
- LED IR 850nm 530mW
- LED Azul
- LED Verde
- LED Rojo

Con los tres LEDs que emiten en azul, verde y rojo se recorre gran parte del espectro visible, mientras que con los otros dos que emiten en el infrarrojo, se abarcará una zona más alta del

Los cinco LEDs tienen el mismo montaje en forma de estrella que sirve como placa predisipadora y donde el chip se encuentra centrado en la misma. Tienen el mismo tipo de lente integrada que está compuesta por una resina transparente para concentrar el haz de luz y que sea menos disperso. De este modo, teniendo características similares en cuanto a su montaje, se podrá hacer una valoración y comparación más objetiva entre ellos. En la siguientes figuras, donde las dimensiones están en milímetros, se muestran sus estructuras representadas dos veces al ser de diferentes fabricantes. A la izquierda Seoul Semiconductor(verde,rojo y azul) y a la derecha los dos Osram(IR850nm 940nm)

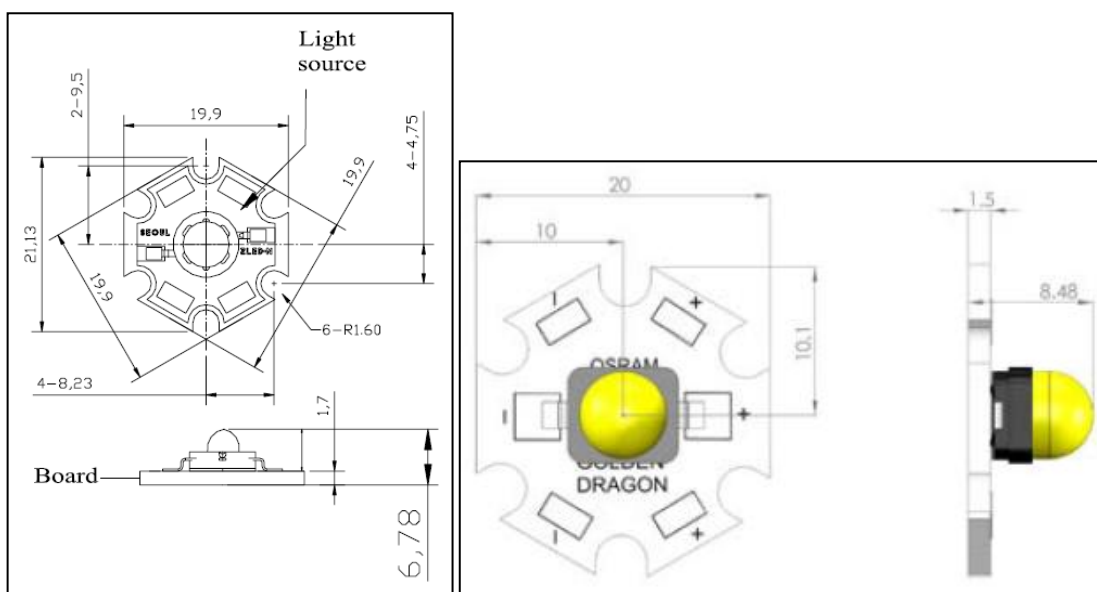


Figura 84

Como se comentaba en el apartado 2.2 sobre las diferentes ópticas utilizadas sobre un mismo LED en función de su funcionalidad, Osram ofrece para estos IR tres tipos de encapsulados.

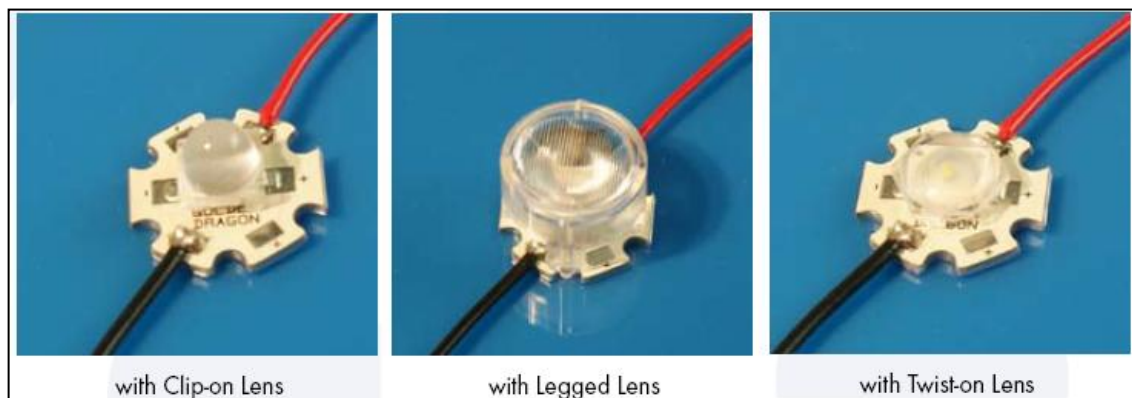


Figura 85

Algunas de las características de los LEDs anteriores del espectro visible (azul, verde y rojo) que nos indica el fabricante son:

- Alta luminosidad.
- Diseñados para trabajar con corrientes elevadas.
- Resistencia térmica baja.
- SMT (Surface Mount Technology) o tecnología de montaje superficial.

Como curiosidad se proponen en el datasheet diferentes usos para estos LEDs como pueden ser de flash para teléfono móvil, como luz tanto de señalización como de ambiente para automóviles, señales de tráfico, etc.

Para los LEDs IR el fabricante proporciona unas características más técnicas y específicas:

- Tiempo de vida superior a 100000 horas emitiendo al 70% de su flujo radiante.
- Tamaño de 20mm x 20mm
- Rango de corriente: Hasta 1A para DC y 5A para pulsada.

Para estos LEDs además se proporcionan unas medidas de seguridad que no se especificaban en los de luz visible. Una de ellas es no mirar directamente al haz de luz aunque no sea visible y no apuntar a los ojos del resto de la gente para evitar que la luz infrarroja dañe el ojo, al igual que no tocar el LED cuando esté en funcionamiento para evitar posibles quemaduras. En cuanto a protección del propio LED especifica que no se conecte a fuentes de alimentación que no estén limitadas en corriente. Estas precauciones también hay que tenerlas para los diodos de espectro visible aunque el fabricante no lo especifique.

En las Tablas V y VI se muestran las especificaciones de los LEDs anteriormente nombrados.



Tipo LED $I_F = 350mA$ $T_A = 25^\circ$	Longitud de onda (nm)			Tensión directa (V)			Ángulo visible (deg)	Flujo Luminoso (lm)
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max		
Azul	455	465	475	2.9	3.25	3.8	130	22
Verde	520	525	535	2.9	3.25	3.8	130	70
Rojo	618	625	630	2.0	2.3	3.0	130	48

Tabla V

Tipo LED	Flujo radiante (mW)		Tension directa (V)		Ángulo radiancia (-3dB)	Reverse voltage (Vmax)
	Tipico	Max	@1A	@5A		
940nm	550	1250	1.4	2.0	$\pm 20^\circ$	1
850nm	630	1250	1.5	2.0	$\pm 20^\circ$	1

Tabla VI

Se puede apreciar que para indicar el flujo de luz en el caso de los de espectro visible utilizan lúmenes (flujo luminoso, unidad fotométrica), mientras que para los IR usan vatios (flujo radiante, unidad radiométrica). Esto es debido a que, como se comentaba en el apartado 2.4.- Espectro Visible, los lúmenes están definidos de acuerdo a la sensibilidad del ojo a una longitud de onda determinada, por tanto como el ojo no percibe ningún estímulo en el infrarrojo, los lúmenes de estos emisores serán siempre 0.

Al tratarse de LEDs de potencia, la alimentación se ha hecho mediante el uso de drivers. Estos drivers se utilizan para garantizar un suministro de corriente constante, para controlar la alimentación de los LEDs, permiten dimming gracias a una entrada para una señal PWM (Pulse Width Modulation) con la que contralar el brillo y reducir el consumo y el calentamiento, etc.

8.1.1.- SOPORTES

Uno de los papeles importantes del LED es su eficiencia. Para ello la refrigeración es fundamental, además de imprescindible para evitar que se dañe. Estos LEDs, y por norma general todos los de potencia, necesitan tener una base en contacto que haga que el calor generado se disipe eficientemente. En este caso, se utilizará parte de la misma placa de aluminio de la base de 1.5mm de grosor en contacto con la estructura metálica de cada LED. En este proyecto la temperatura alcanzada por los diodos no será elevada debido al corto espacio de tiempo que estarán luciendo y a que la corriente que circule por ellos estará controlada en todo momento.

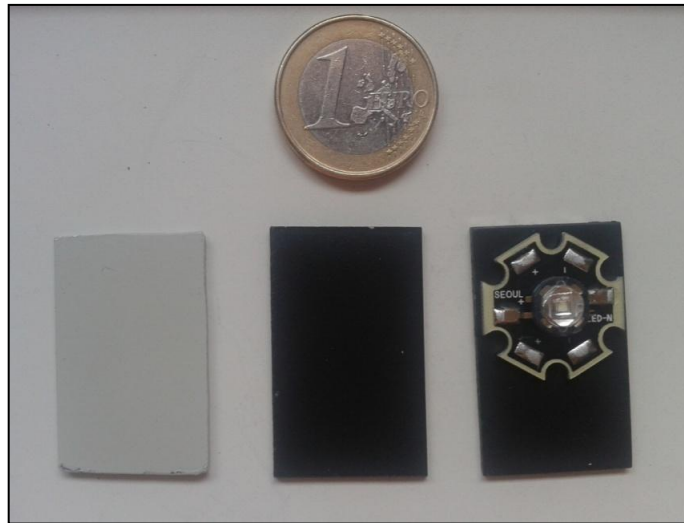


Figura 86

Para facilitar la conducción de calor entre las dos superficies en contacto se puede utilizar pasta térmica:



Figura 87

Que la longitud de la placa sea superior al tamaño del propio LED, además de ofrecer mayor disipación, se debe a que irá enganchada al soporte del motor paso a paso. Originalmente este soporte era de color metalizado como se muestra en la imagen de la izquierda. Para evitar en lo máximo de lo posible reflejos no deseados como en el resto de materiales metálicos del proyecto, se procede a pintarlo del mismo color negro mate.

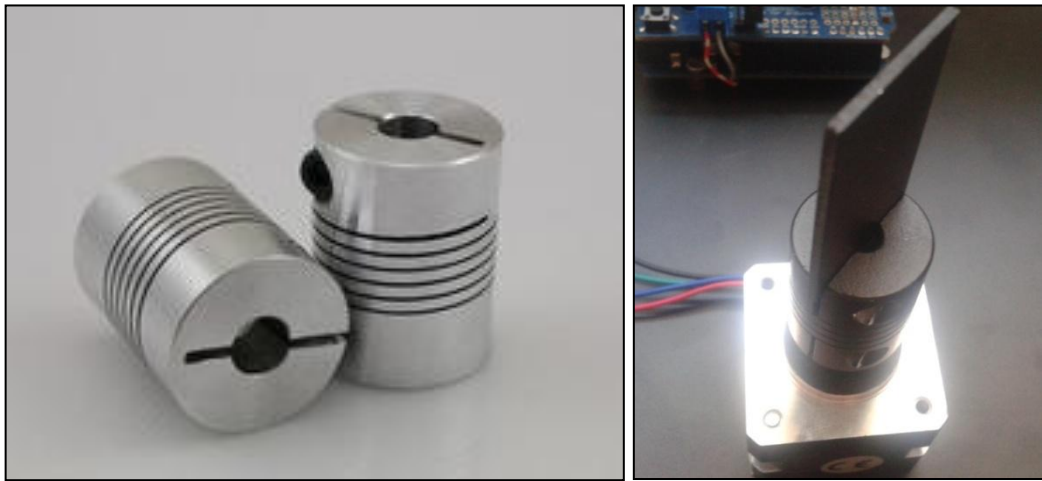


Figura 88

Como la anchura de la ranura del acoplador del eje del motor donde va a ir alojado el soporte para el LED era demasiado estrecha, se aumentó gracias a una Dremel y un disco de lija. Se han fabricado tantos soportes disipadores como diodos, haciendo el corte, lijado y pintado de los cinco a la vez. También se ha procedido al taladrado y avellanado de los agujeros para quitar las rebabas de todas placas y que el contacto entre superficies sea perfecto.

Finalmente queda cada LED atornillado a cada placa de soporte mediante 2 tornillos, que a su vez irá sujeto con el acoplador del eje del motor mediante la ranura ensanchada.



Figura 89

8.2.- DRIVER

Análogamente a la elección de los LEDs, se buscó un driver que tuviera una versión de evaluación y que cumpliera las condiciones de alimentación que requerían los LEDs finalmente seleccionados. Se optó por adquirir el modelo MAX16820, capaz de suministrar una corriente de hasta 1A y permitiría sacarle todo el partido a los LEDs.

- MAX16820 Evaluation Kit: Alimentado con una tensión mínima de 5V y máxima de 28V, es capaz de ofrecer a su salida una corriente de 1A. Para controlar el brillo de los LEDs tiene una entrada VIN para una señal PWM y así controlar el dimming. Esta señal debe tener una frecuencia comprendida entre 100Hz-20KHz. Además este kit posee un circuito UVLO (undervoltage-lockout) encargado de cancelar la alimentación si el voltaje es inferior a un umbral de trabajo determinado.

Para variar la corriente continua que suministra el driver a su salida es suficiente con variar la resistencia R1:

$$R1 = \frac{0,2V}{I_{LED}}$$

Ecuación IV

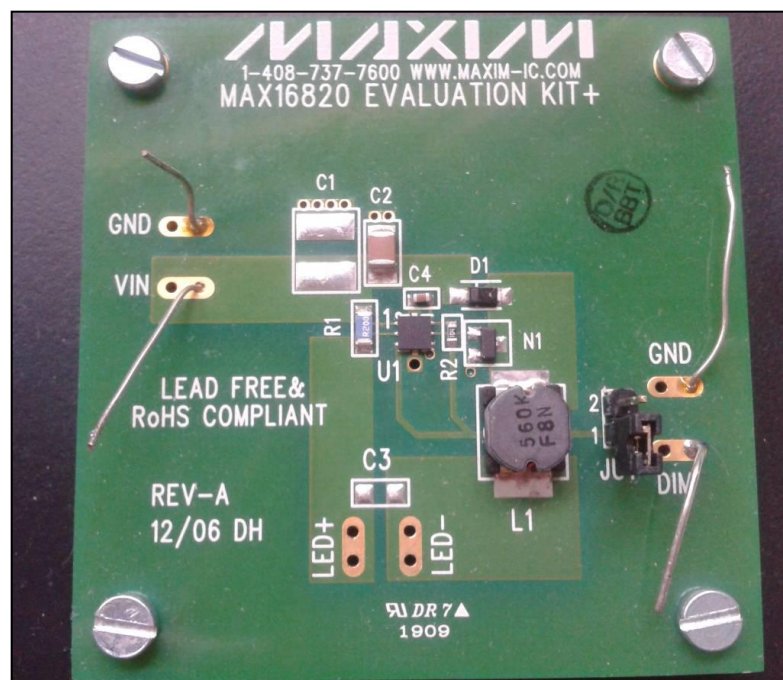


Figura 90

Los componentes y señales que caracterizan a este driver se definen a continuación:

- VIN: Alimentación del driver
- C1: Condensador para eliminar el rizado si la fuente de alimentación está alejada.
- R1: Resistencia con la que controlar la cantidad de corriente que atravesará los LEDS.
- JU1: Jumper para habilitar/deshabilitar el driver así como el control mediante dimming.
- N1: MOSFET canal N (30V, 2,7A) que funciona como switch.
- GND: Masa del driver.

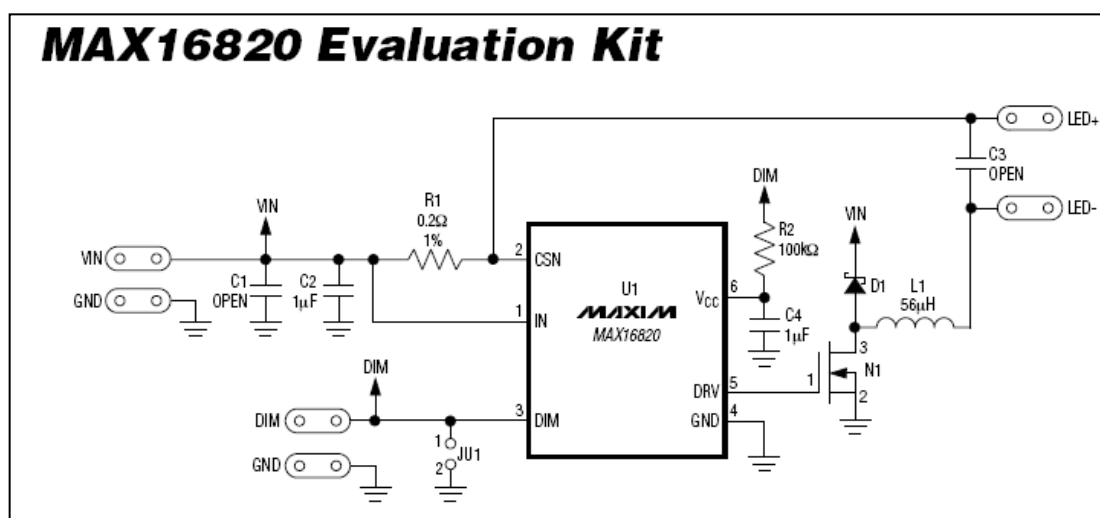


Figura 91

Para que las medidas sean realizadas en las mismas condiciones que aporta el fabricante de los LEDs, la corriente que circula a través de ellos debe ser de 350mA, por lo que R1 debe valer según la ecuación V, $R1=0,570\Omega$.

Para conseguir un valor aproximado se sitúan dos resistencias de 1Ω en paralelo obteniendo un valor de $0,5\Omega$. Con esta resistencia la corriente teórica impuesta por el driver debería ser de $I_{LED_{TEORICA}} = 400mA$. En la práctica, midiendo en serie con el polímetro, esta corriente es de $I_{LED} = 410mA$. Esta variación respecto al valor calculado se debe principalmente a la tolerancia de las resistencias.

Se procede por tanto a desoldar la resistencia R1 original de color azul para soldar dos resistencias en paralelo en la misma ubicación.



Figura 92

8.3.- MECANIZADO

Como base para todos los elementos del proyecto, se ha utilizado una placa de aluminio de 50cm x 30cm y de 1.5mm de grosor. Esta placa ligera y rígida es fácil de taladrar, por lo que perforarla para situar cada elemento es sencillo.

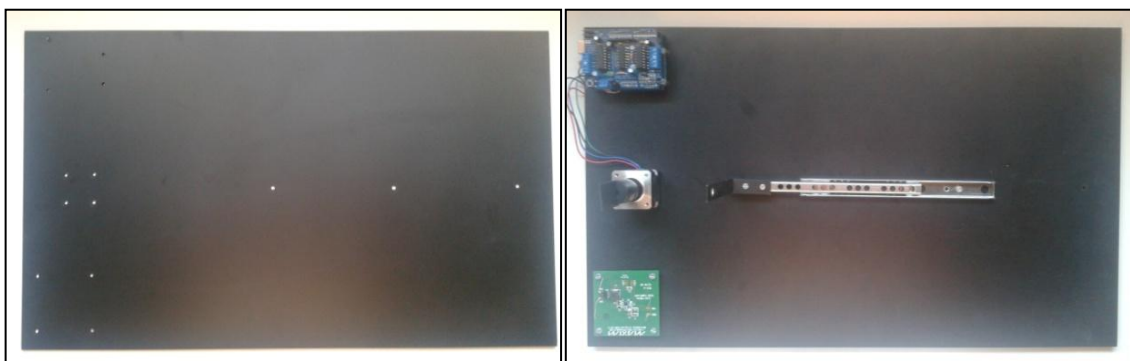


Figura 93

Como se observa en la imagen de la derecha, tanto el driver como la placa de Arduino están ubicados en las esquinas para facilitar el conexionado de los periféricos necesarios. El motor y la guía están situados en la parte central. La pieza en forma de L atornillada a la guía permitirá que la fibra, ubicada en su extremo superior, se aproxime o aleje a los LEDs. Así, la distancia mínima entre la fibra y el LED será de 8cm y la máxima 50cm.



Figura 94

El conector utilizado para que la fibra óptica quede fija ha sido un SMA. Como originalmente este conector tiene un dieléctrico rodeando al activo en su interior, se ha procedido a su extracción utilizando una broca, de modo que la fibra óptica quede al aire dentro del conector. A la izquierda el antes y a la derecha el después.

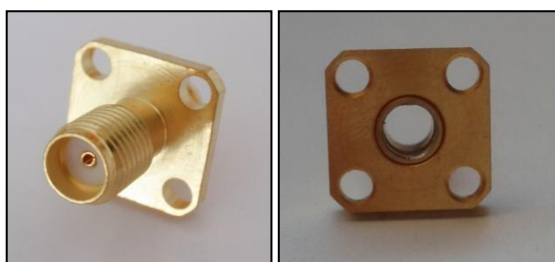
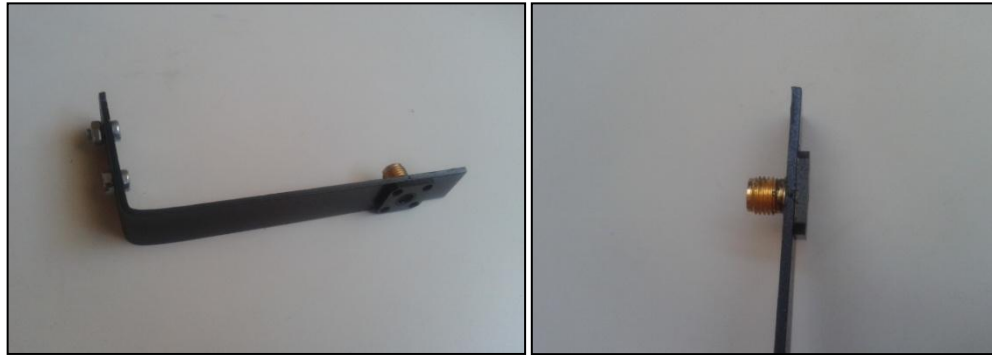
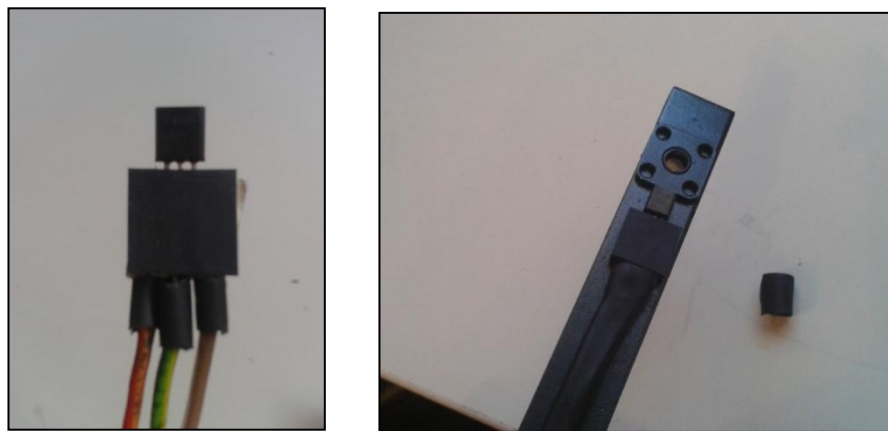


Figura 95

Una vez unidos el conector y el soporte, se adhieren con pegamento para conseguir una unión permanente. Se pinta también de negro la parte del SMA que queda expuesta al LED evitando pintar la zona de la rosca para que no quede pegajosa o irregular.

**Figura 96**

Como las medidas del espectrómetro se pueden ver afectadas por el calor emitido por el LED en su haz, se situará un LM35 justo debajo del conector SMA a modo de termómetro, y otro sobre la placa de Arduino para medir la temperatura ambiente e intentar analizar esas posibles variaciones. Para su colocación bajo el conector, se hizo uso de un soporte adhesivo que se perforó con las 3 patillas del LM35 haciendo que quedaran al aire, aislado y sin contacto con ninguna pieza de aluminio que pudiera alterar la medición de la temperatura. Las soldaduras se aislaron individualmente y luego todos los cables en conjunto con termoretráctil negro para darle mejor aspecto.

**Figura 97**

Teniendo en cuenta que la caracterización y análisis de un LED se puede dar sin una aislación de fuentes lumínicas externas, se ha construido una especie de túnel con el que se pretende evitar que esas fuentes interfieran en las medidas. Este túnel se ha realizado también con aluminio, pero esta vez de 1mm de grosor al no ser necesaria tanta rigidez y facilitar de este modo su moldeado. Su longitud es la misma que la de la base, 50cm, mientras que la altura es la mínima necesaria para que la zona más alta del soporte de la fibra no golpeará en el aluminio. La anchura de la base que hace de soporte del túnel se tuvo que recortar para que entrara entre las placas de Arduino y del driver.

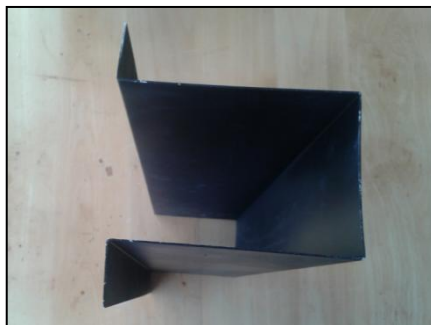


Figura 98

Una vez atornilladas las placas, guía, motor y completado en definitiva el montaje, se realiza el conexionado del resto de equipos que se explicarán en el siguiente apartado.

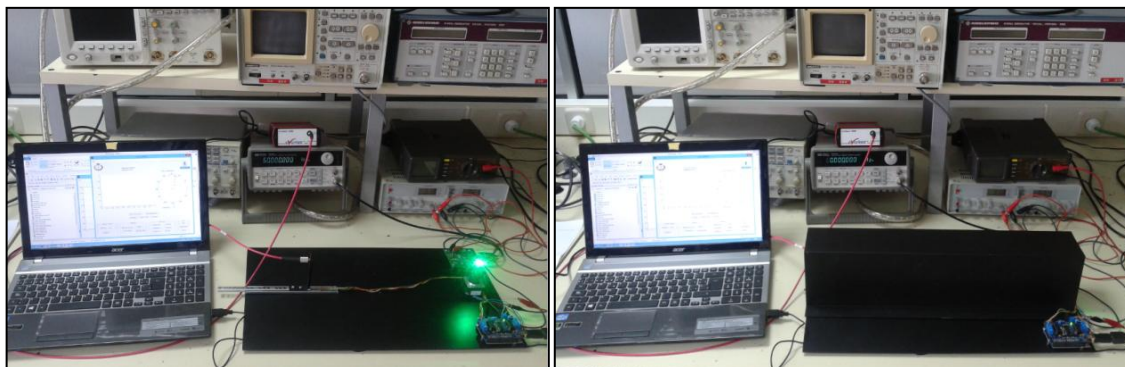


Figura 99

La pieza con forma de túnel permite que el conjunto diodo-disipador se mueva libremente así como la guía que sostiene la fibra óptica. Para que el montaje no aumentara su volumen esta pieza queda apoyada sobre la parte central de la misma sin sobresalir, dejando la placa del driver como de Arduino al aire.

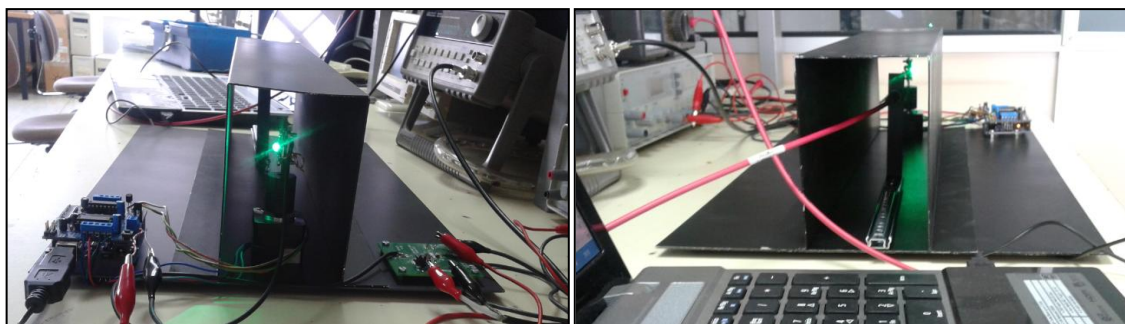


Figura 100

8.4.- MEDIDAS

8.4.1.- EQUIPOS

Para la realización de este proyecto se hizo uso de los equipos disponibles en el laboratorio de la escuela.

- Fuente de alimentación de corriente continua Promax modelo FA-665:



Figura 101

Proporciona alimentación tanto al driver como a la placa Adafruit, que a su vez alimentan al diodo LED y al motor paso a paso respectivamente.

- Generador de señal HP 33120A:

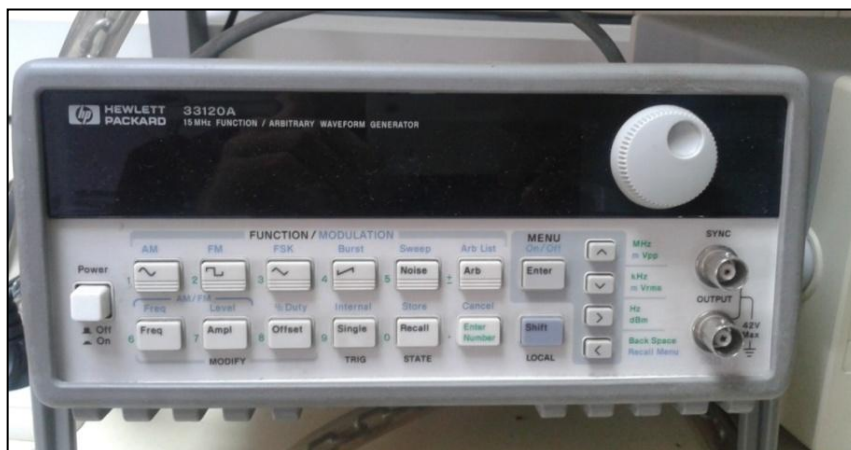


Figura 102

Se encargará de generar la señal PWM de entrada para el driver del LED en sus pistas etiquetadas como DIM (dimming) y GND (masa)



- Polímetro



Figura 103

Utilizado para comprobar la corriente que circula por el LED y la continuidad de algunas soldaduras.

8.4.2.- PWM

En un primer momento se intentó generar la señal PWM mediante uno de los pines específicos de la placa Arduino (etiquetado como PWM en la misma), de modo que se pudiera controlar la frecuencia y ciclo de trabajo con MATLAB. Así se controlaría el brillo del diodo mejorando considerable su eficiencia respecto al uso de corriente continua, se reduciría el calor producido por el mismo al circular menos corriente y por tanto se disminuiría su consumo.

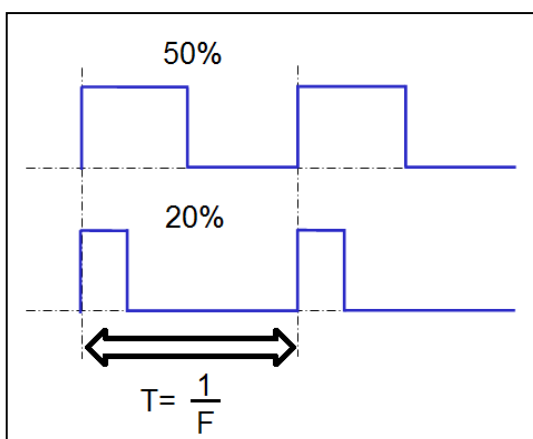


Figura 104

El principal problema fue que al estar la placa Arduino comandada por MATLAB y ser este un programa puramente secuencial, no se podía establecer un bucle dedicado para este proceso a la vez que se medía y se realizaban el resto de tareas. Aún así se estableció un bucle a modo de prueba para ver si podría ser viable esta solución.

Conectando un LED al pin PWM de Arduino y lanzando las instrucciones en MATLAB, se comprobó que el retardo producido entre la comunicación MATLAB-Arduino hacían imposible que se pudiera utilizar este como generador de la señal. Esta prueba se realizó configurando una frecuencia de 50Hz y un ciclo de trabajo del 100% donde se apreció un parpadeo constante del LED que no se correspondía a la configuración establecida. Incluso aumentando la frecuencia a 100Hz el parpadeo era notable. Por este motivo se utilizó el generador de señales HP mostrado en el apartado anterior y se descartó por completo esta opción.

Se procede entonces a configurar la señal PWM con el generador de señales. Esta señal se puede configurar para que ciclo de trabajo sea de entre el 20% y el 80%. La frecuencia configurada en una primera prueba es de 500Hz con el ciclo de trabajo máximo permitido del 80%. El driver alimenta al LED con una corriente de 410mA y la distancia entre el conector SMA de la fibra y el diodo es de medio metro.

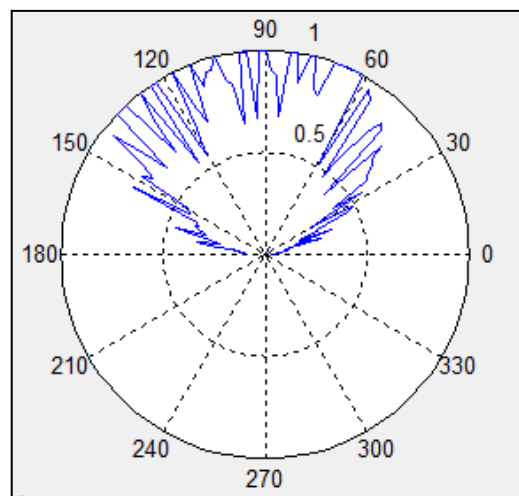


Figura 105

Durante el barrido se observó que había muestras como si el LED estuviera prácticamente apagado y que se reflejaron al acabar el recorrido en el diagrama de radiación. Esto se debe a que la captura del espectro se producía en el momento que la señal PWM tenía un nivel bajo y por tanto el driver no alimentaba el diodo. Aunque aparentemente a nuestros ojos no se detectaba el parpadeo, queda reflejado que sí se producía. Por tanto la frecuencia tiene que ser lo suficientemente alta para que no se presenten muestras con niveles de intensidad muy bajos en el diagrama del LED.

Estas muestras con niveles de intensidad bajos disminuyen a medida que aumenta la frecuencia o el ciclo de trabajo. La intensidad del haz en esos puntos también depende del decaimiento de la luz entre pulso y pulso de excitación del propio diodo, ya que su apagado cuando se interrumpe el suministro de corriente no es instantáneo.

Este fenómeno presente al utilizar PWM se puede evitar con una sincronización entre la emisión y la captura de espectro, obteniendo por tanto niveles siempre elevados de luz y las ventajas de utilizar esta señal.

8.4.3.- RESULTADOS

Se comenzó con el diodo de color verde, donde se comprobó que con la misma alimentación con la que el fabricante proporciona sus características de 410mA, a 20cm de distancia entre el emisor (diodo) y el receptor (fibra), y con el ciclo de trabajo mínimo permitido por el generador del 20% se saturaba el espectrómetro cuando incidía directamente el haz de luz sobre la fibra..

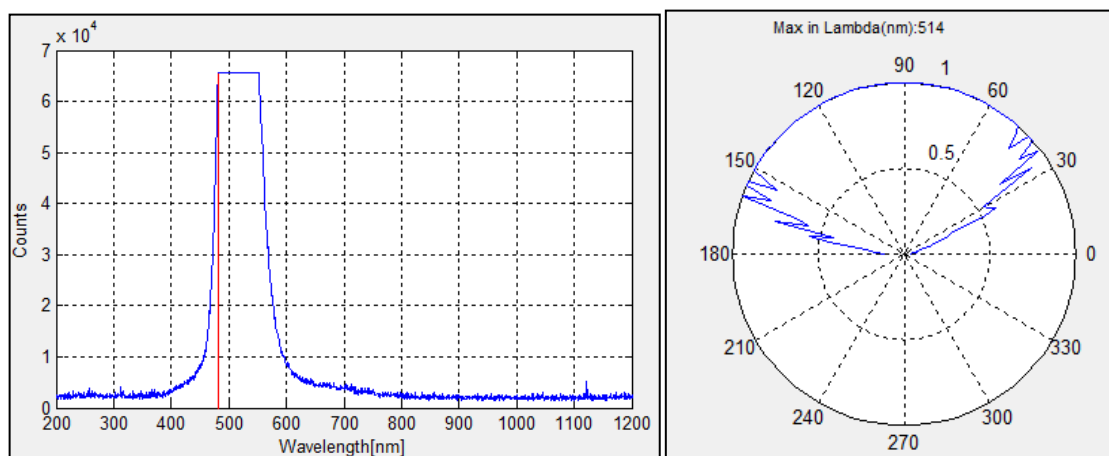


Figura 106

La línea roja vertical define el máximo del espectro entre los 200-1100nm. En este caso se sitúa en la longitud de onda donde empieza la saturación. En el eje X el rango de longitudes se ha modificado debido a que por debajo de los 150nm había muestras vacías y por encima de los 1200nm se registraba una curva ascendente hasta la última muestra del espectrómetro que no se correspondía a ninguna muestra real.

Para evitar la saturación como el fabricante no especifica en qué condiciones se hicieron esas medidas, se procedió a alejar la fibra mediante la guía a la posición más alejada que permitía el montaje que son 50cm. Con esta nueva configuración se modifica únicamente la distancia emisor-receptor respecto a la primera medida, pero es suficiente para que no se sature.

LED VERDE

Es el primer diodo a analizar del espectro visible de la empresa SEOUL SEMICONDUCTOR. Está alimentado con 410mA y la fibra receptora a 50cm del diodo como se comentaba con anterioridad. Esta configuración se mantendrá para caracterizar el resto de LEDs. Nada más alimentarlo destaca cómo ilumina toda la habitación con un verde intenso que es molesto si incide directamente sobre el ojo.

La señal PWM utilizada tiene una frecuencia de 2.85KHz donde ya no se presentan muestras con intensidad más baja. El ciclo de trabajo seleccionado es del 80%.

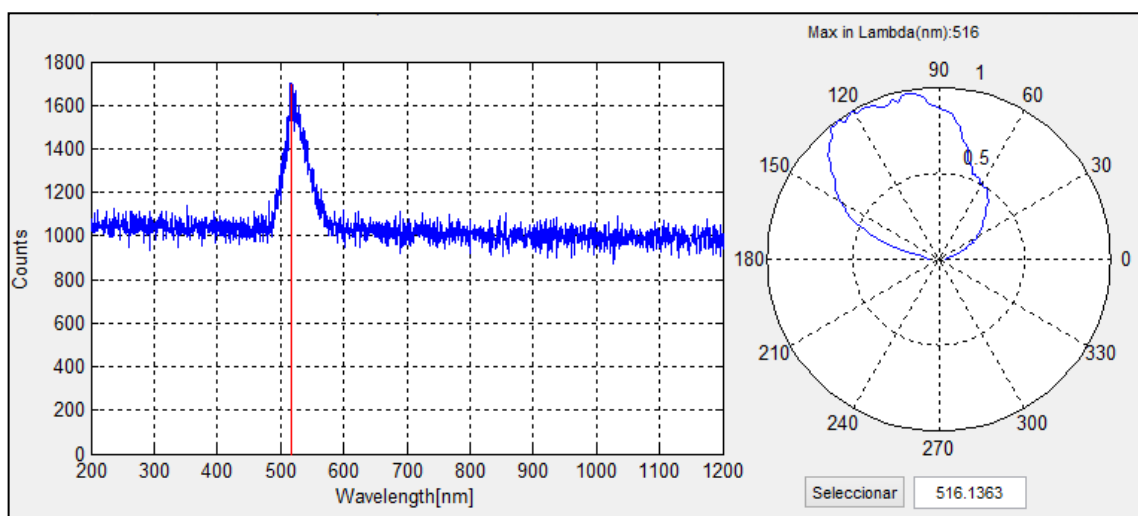


Figura 107

La longitud de onda de máxima intensidad se sitúa a 516nm. Se observa esta longitud tanto gráficamente en la ventana de la izquierda marcada con una línea roja vertical, como sobre el diagrama de radiación de la parte derecha. También viene definida en el recuadro blanco editable de debajo del diagrama, que puede ser modificado para cambiar la longitud de onda a representar.

En cuanto a la representación del diagrama se observa que no es homogéneo, que dividiéndolo en dos mitades no se corresponde las intensidades, por ejemplo, 30° respecto al máximo en una dirección a la otra. Además está desplazado respecto al punto de incidencia directa sobre la fibra. Esta caracterización fue repetida en varias ocasiones para descartar posibles errores de calibración o mala alineación emisor-receptor obteniendo siempre los mismos resultados, quedando por tanto descartado cualquier posible error de montaje o medida.

LED ROJO

Con la misma distancia entre el diodo y la fibra que para el LED verde y la misma alimentación de salida facilitada por el driver se procede a caracterizar el color rojo. La señal PWM se mantiene a 2.85KHz y con el mismo ciclo de trabajo que anteriormente

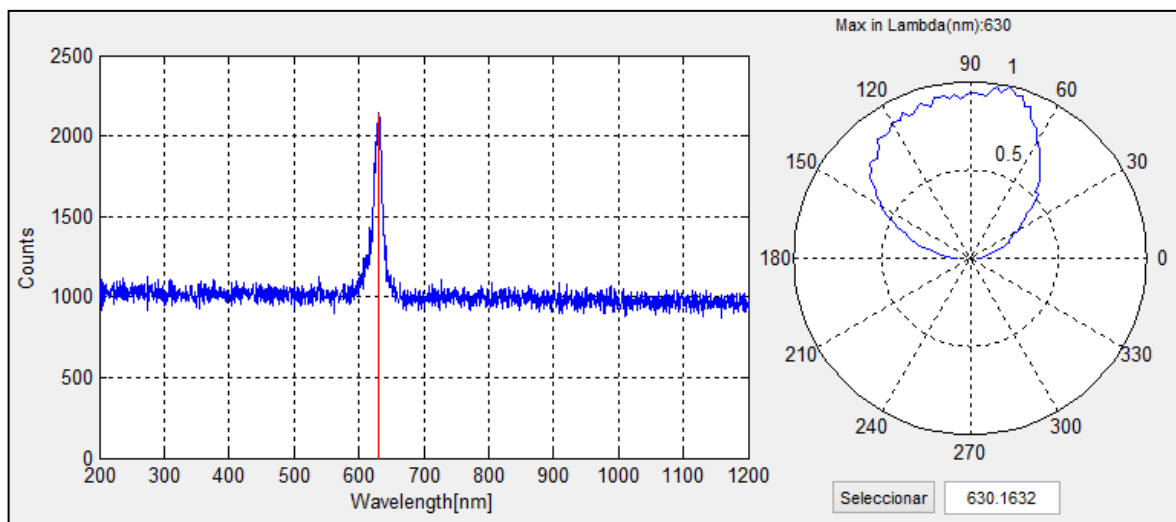


Figura 108

En este caso el máximo de intensidad se sitúa a 630nm. Se observa que aún siendo el suelo de ruido elevado, se aprecia en el espectro perfectamente la luz emitida por el diodo. En cuanto al diagrama se aprecian diferencias considerables respecto a las medidas anteriores. Es más homogéneo y la intensidad con mayor valor está más centrada o cerca a lo que sería la visión directa entre la fibra y el LED representado como 90°.

LED AZUL

Al igual que para los otros dos diodos del espectro visible, la alimentación se mantiene a 410mA, PWM con el mismo ciclo de trabajo y frecuencia. A simple vista se aprecia que a pesar de tener la misma configuración que los dos anteriores su iluminación es levemente inferior. A la hora de medir, esta sensación no queda reflejada en las muestras por lo que queda de manifiesto que para esta longitud de onda el ojo humano es menos sensible y se deberá alimentar con más corriente para que la sensación lumínica de nuestro ojo se equipare al de por ejemplo el diodo verde.

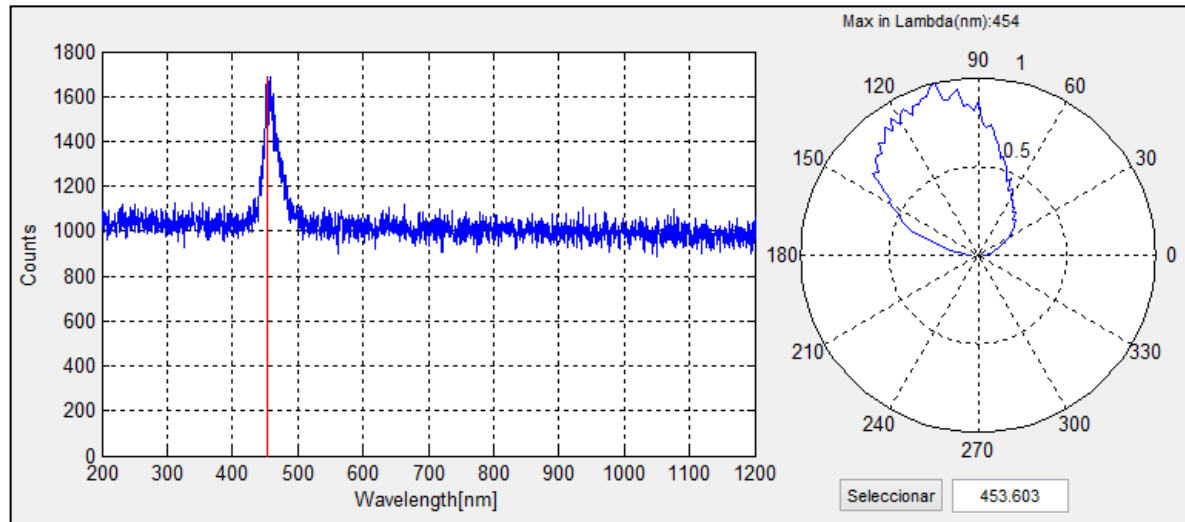


Figura 109

La línea roja vertical de la ventana izquierda sitúa el máximo a una longitud de onda de 454nm. En la de la derecha se observa que el diagrama vuelve a tener el mismo patrón desviado hacia la izquierda observado en el diodo verde. Sin embargo en este caso el haz parece más directivo y homogéneo por lo que queda de manifiesto que o bien la emisión del LED o bien la propia óptica en forma de lente para concentrar el haz no se ha conseguido que sea igual para los tres diodos.

LED INFRARROJO 850nm

Los dos diodos IR se recuerda que no son del mismo fabricante que los tres anteriores de espectro visible. En este caso el fabricante seleccionado es OSRAM. Tanto el montaje en forma de estrella con placa predispadora como la lente para concentrar el haz son aparentemente iguales a simple vista para todos los LED.

Para caracterizarlos se siguió el mismo procedimiento y configuración que para los de color verde, rojo y azul. La alimentación proporcionada por el driver es de 410mA de nuevo, con el generador de señales ofreciendo PWM a 2.85KZ y ciclo de trabajo del 80%. La distancia sigue siendo de 50cm.

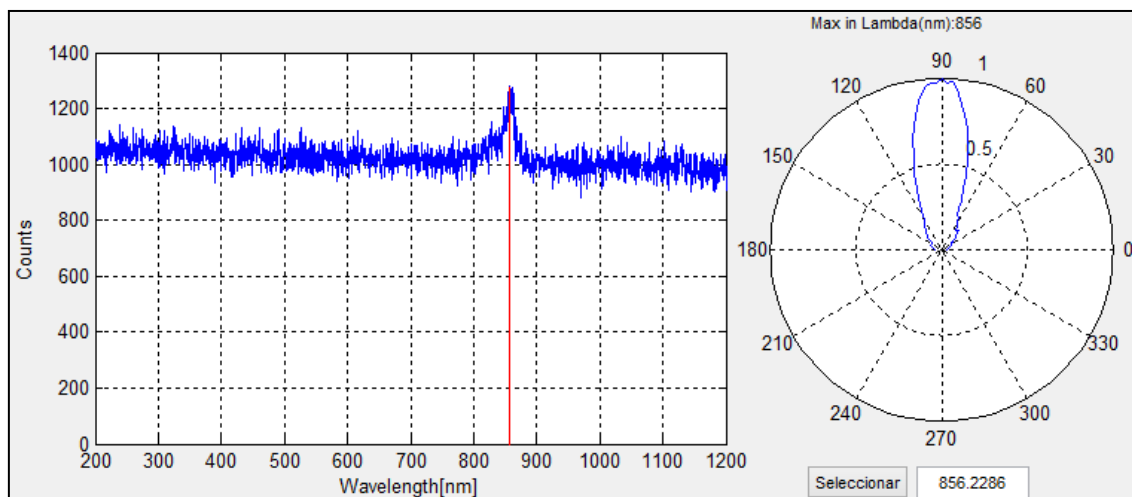


Figura 110

En ambas ventanas se observan que la diferencia es bastante notable respecto a los diodos caracterizados hasta ahora. En la ventana izquierda donde se muestra todo el espectro, se aprecia que la primera muestra que se dibuja tiene valores de intensidad menores que en los casos anteriores. Esto es debido a la directividad del diodo que consigue que la mayoría de fotones sean emitidos hacia la zona donde la lente los focaliza. Esta directividad queda reflejada en el diagrama donde el máximo de intensidad queda perfectamente centrado en el ángulo donde se enfrenta el diodo con la fibra óptica.

Tanto en la zona izquierda como derecha del diagrama, las intensidades son similares consiguiendo un diagrama que se ajusta a lo especificado por el fabricante y que se mostrará más adelante.

LED INFRARROJO 940nm

Manteniendo la configuración de todos los equipos y de señales generados hasta el momento se procede a la caracterización del último diodo.

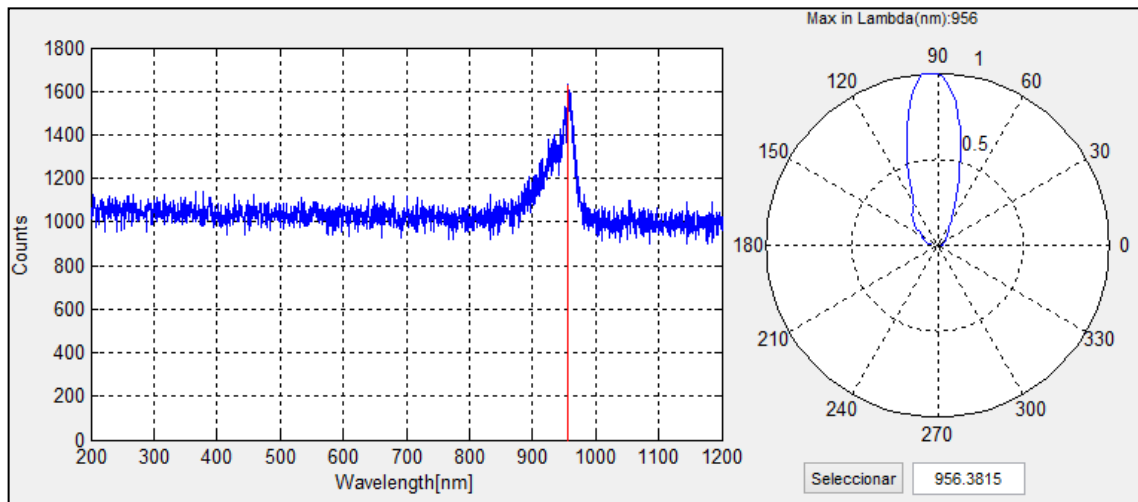


Figura 111

Tomando como referencia el diodo anterior, los resultados se ajustan a lo esperado. El máximo de intensidad marcado de nuevo por la línea roja se sitúa a 956nm. Al igual que antes, debido a lo directivo de su haz, la primera muestra dibujada en la ventana izquierda tiene unos niveles inferiores a los presentados en los diodos de espectro visible. En cuanto a su diagrama de radiación está centrado, homogéneo y ajustado a las especificaciones del fabricante.

Se observa que en la parte izquierda del diagrama aparece lo que se asimilaría a un lóbulo secundario en el diagrama de radiación de una antena. Esto puede ser causado por un defecto de fabricación en esa parte de la lente que haría que en un ángulo de aproximadamente 45° respecto al máximo, los niveles de intensidad sean mayores que en los ángulos adyacentes.

8.5.- COMPARATIVA RESULTADOS CON DATOS FABRICANTE.

Para obtener la misma escala para los diodos de espectro visible que la facilitada por el fabricante, se han cambiado manualmente los ejes de modo que las longitudes de onda mostradas fueran desde 400nm hasta 700nm, y no de 200nm hasta 1200nm como las mostradas hasta ahora. También se han normalizado las señales quedando por tanto los ejes de las medidas igual que los datos de las hojas de características.



SIN FILTRAR

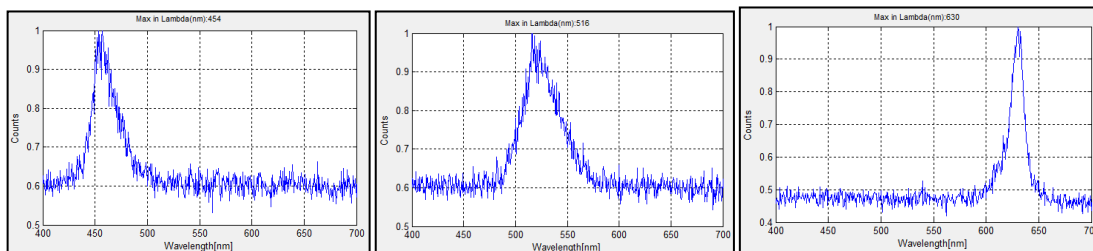


Figura 112

FILTRADOS BUTTERWORTH

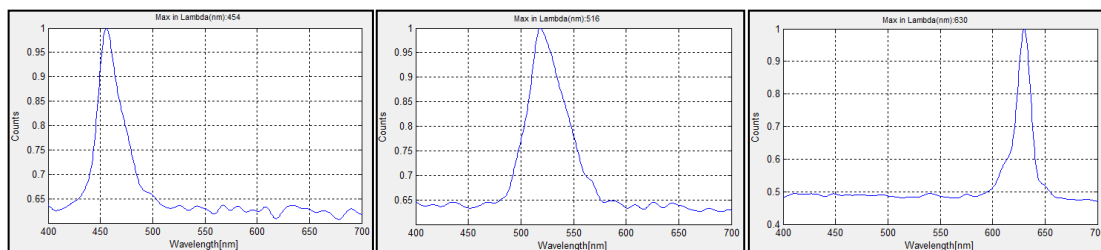


Figura 113

INFORMACION DEL FABRICANTE

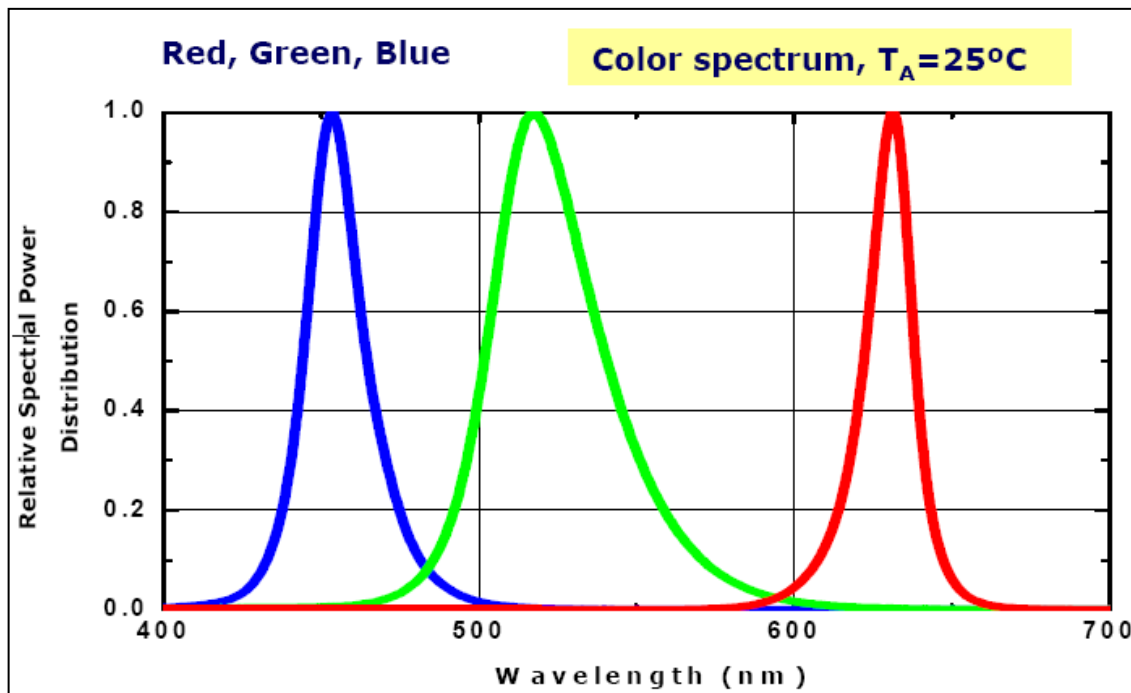


Figura 114

Como se puede observar en las figuras anteriores, la distribución espectral proporcionada por SEOUL SEMICONDUCTOR se ajusta a primera vista a los valores obtenidos en el laboratorio. Se aprecia que las intensidades de las longitudes adyacentes a cada máximo de color son muy similares a lo medido, haciendo que las curvas sean muy parecidas. Sin embargo comparando el máximo de la longitud de onda capturado con los rangos proporcionados se observa que estas curvas están desplazadas a los extremos de esos rangos:

- **Azul:** Tiene el máximo de intensidad a 454nm, justo en el límite inferior del rango 455nm-475nm.
- **Verde:** Máximo a 516nm, debiendo estar entre 520nm-535nm.
- **Rojo:** Máximo a 630nm, siendo el rango especificado 618nm-630nm.

En el análisis del diagrama de emisión de los diodos también se aprecian diferencias notables.

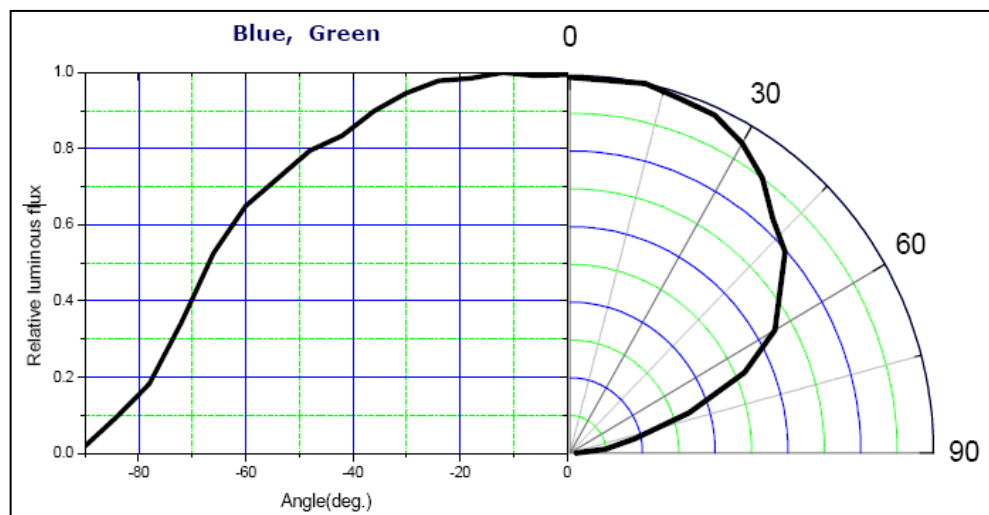


Figura 115

Comparando el diagrama facilitado (que es el mismo para los diodos azul y verde) con los datos obtenidos en el laboratorio en el apartado 8.4.3, se aprecia que el ángulo del máximo está desplazado en ambos unos 30° hacia la izquierda respecto al enfoque directo a la fibra receptora. Además estos dos diagramas aún estando desplazados deberían ser iguales entre ellos, y tampoco lo son.

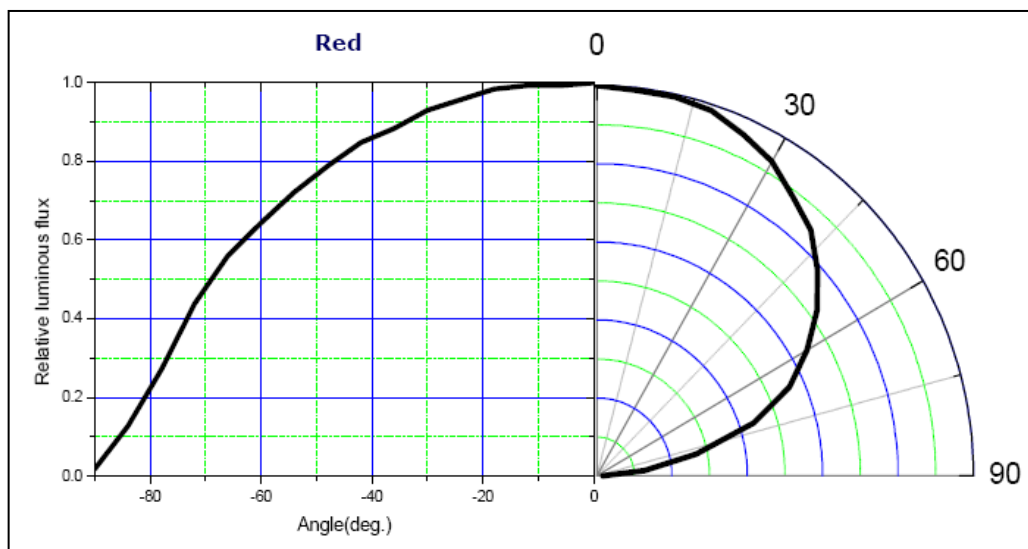


Figura 116

Al igual que pasa para los diodos azul y verde, el diagrama obtenido no coincide del todo con el proporcionado en las hojas de características. Aún así, se aprecia que en este caso sí es más similar que en los casos anteriores y que el máximo de intensidad está más centrado. Las medidas en el giro de 180° también son más próximas y en definitiva está más conseguido que los dos anteriores.

Para los dos diodos que trabajan en el infrarrojo se muestra que las hojas de características sí se ajustan a lo medido en ambos casos. El diagrama de radiación proporcionado por OSRAM tanto para el LED de 850nm como para el de 940nm es el mismo.

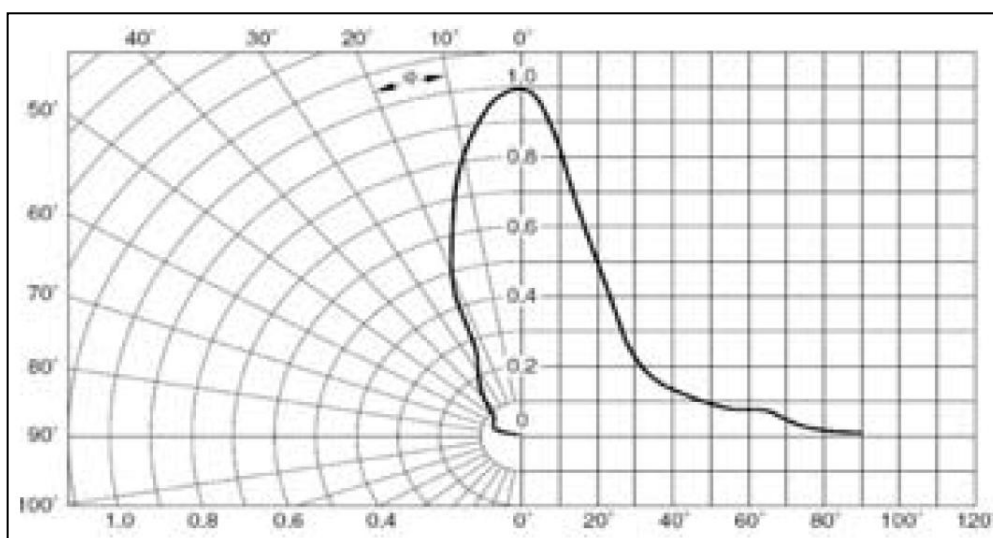


Figura 117

En las dos medidas hechas para estos diodos, se muestra que el diagrama es muy similar para ambos por no decir que son prácticamente iguales. El máximo de intensidad se corresponde al punto de máxima incidencia del haz a la fibra receptora y los niveles de intensidad según el diodo va rotando coinciden con lo plasmado en el papel por el fabricante.

Como curiosidad para estos LED IR, OSRAM también facilita en el mismo datasheet el diagrama del diodo sin la lente.

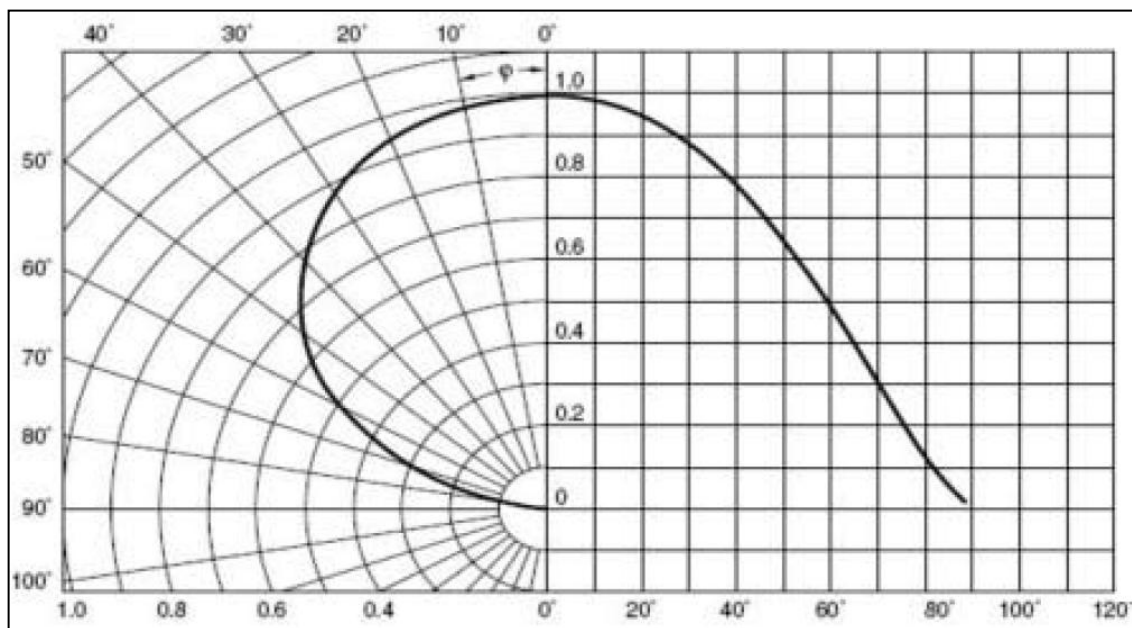


Figura 118

Se aprecia a simple vista el efecto de la lente. Con ella puesta el "*ancho de haz a 3dB*" o el punto donde la intensidad disminuye a la mitad respecto al máximo es de 20°, mientras que sin lente el haz es mucho menos direccional llegando a la mitad a los 60°.



9.- PRESUPUESTO

A lo largo del proyecto se han utilizado una serie de medios materiales y de recursos humanos de los que se analizará su coste.

COSTE DE MATERIAL

DESCRIPCION	MODELO	UNIDADES	PRECIO UNIDAD (€)	PRECIO TOTAL (€)
Espectrómetro Avantes	AvaSpec-2048-USB2-UA-50 200nm-1100nm	1	2.870€	2.870€
Libreías espectrómetro	AS51216 DLL Interface 32/64bits plataforma USB2	1	431€	431€
Cable fibra óptica	FC UV/VIS 600um diámetro 2metros	1	183€	183€
Power LED Azul	B42182 Z-Power P4 LED SEOUL SEMCONDUCTOR	1	6,66€	6,66€
Power LED Rojo	R42182 Z-Power P4 LED SEOUL SEMCONDUCTOR	1	5,85€	5,85€
Power LED Verde	G42182 Z-Power P4 LED SEOUL SEMCONDUCTOR	1	8,42€	8,42€
Power LED IR850	ILH-ID01-85NL-SC201 OSRAM	1	16,88€	16,88€
Power LED IR940	ILH-ID01-94NL-SC201 OSRAM	1	16,88€	16,88€
Placa ARDUINO	ARDUINO UNO Rev3	1	19,95€	19,95€
Placa Adafruit ARDUINO	Adafruit motor shield for ARDUINO KIT	1	21,20€	21,20€
Motor paso a paso	Motor 35 x 35 x 28 mm 200pasos 500mA 10V	1	19,80€	19,80€
Acoplador eje motor	Acoplador aluminio flexible 5mmx5mm	1	2,85€	2,85€
Driver LED	MAX16820 Evaluation Kit MAXIM	1	21,62€	21,62€
Plancha aluminio	100 x 30 x 1.5mm FERRETERIA SUBERO	1	10,50€	10,50€



DESCRIPCION	MODELO	UNIDADES	PRECIO UNIDAD (€)	PRECIO TOTAL (€)
Plancha aluminio	100 x 38 x 1mm FERRETERIA SUBERO	1	11,60€	11,60€
Sensor temperatura	C.Integrado Sensor Temperatura LM35	4	0,95€	3,80€
Patas de goma	Blister 18 x 18 x 3.5 mm	1	1,44€	1,44€
Conector SMA	SMA de panel para RG405 RS ONLINE	1	6,60€	6,60€
Tornillos	M3x4	20	0,04€	0,80€
Tornillos	M3x6	4	0,04€	0,16€
Separadores	SP1509	10	0,16€	1,60€
Tuercas	Paso métrica 3	20	0,01€	0.20€
			TOTAL	3.660,81€

COSTE PERSONAL

Para la estimación de este presupuesto se ha tomado el coste de una hora de trabajo de un Ingeniero Técnico de Telecomunicaciones de 30€.

TAREA	Nº HORAS	Coste € / hora	Total
Mecanizado	24	30	720€
Diseño y pruebas	480	30	14.400€
Medidas	72	30	2.160€
Documentación	168	30	5.040€
		TOTAL	22.320€

PRESUPUESTO TOTAL

TOTAL coste material	3.660,81€
TOTAL coste personal	22.320€
Coste TOTAL ejecución	25.980,81€

El coste total del proyecto ha sido de: **Veintidós mil cuatrocientos noventa y seis Euros con ochenta y un céntimos.**



10.- CONCLUSIONES.

Como alternativa a este montaje, se consultó con diferentes empresas que ofrecen soluciones integradas de motor, driver y software, siendo los precios muy superiores en comparación con este proyecto. El software tampoco es libre por lo que no se podría modificar y compatibilizar con el resto de herramientas.

Se ha conseguido el objetivo propuesto en el proyecto haciendo un montaje para analizar los LEDs con una fiabilidad medio-alta comparando con las características ofrecidas por el fabricante de una forma barata. Resulta por tanto una solución de bajo coste y con capacidad de personalización según las necesidades que se presenten.

Se ha realizado el estudio de los diferentes equipos utilizados durante el proyecto, mostrando sus características y prestaciones. La integración de todas las placas y accesorios necesarios en un único montaje permite caracterizar los LED de forma rápida y efectiva, detectando defectos tanto en el haz emitido como en la longitud de onda de trabajo.

Aunque aparentemente todos los LEDs tanto físicamente como por luz irradiada son muy parecidos, queda demostrado que la calidad en los procesos de fabricación no es el mismo para todas las empresas y es determinante para que el producto cumpla con los requisitos ofrecidos. En este caso concreto la calidad de los diodos IR OSRAM frente a los de espectro visible de SEOUL SEMICONDUCTOR es muy superior.

11.- LINEAS FUTURAS DE TRABAJO.

El desarrollo del software y el postprocesado del espectro adquirido son sin duda las labores fundamentales para su mejora. La instalación de otro motor paso a paso con las mismas características que el instalado completaría el hardware necesario para una completa caracterización del diagrama de emisión de los diodos, obteniendo muestras tanto en elevación como en azimuth y generando figuras en 3D en lugar de 2D.

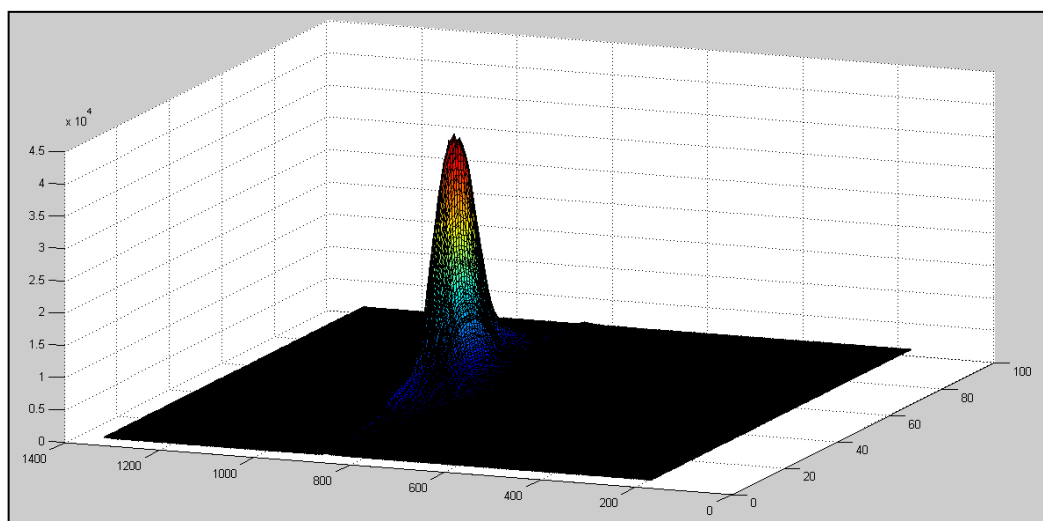


Figura 119

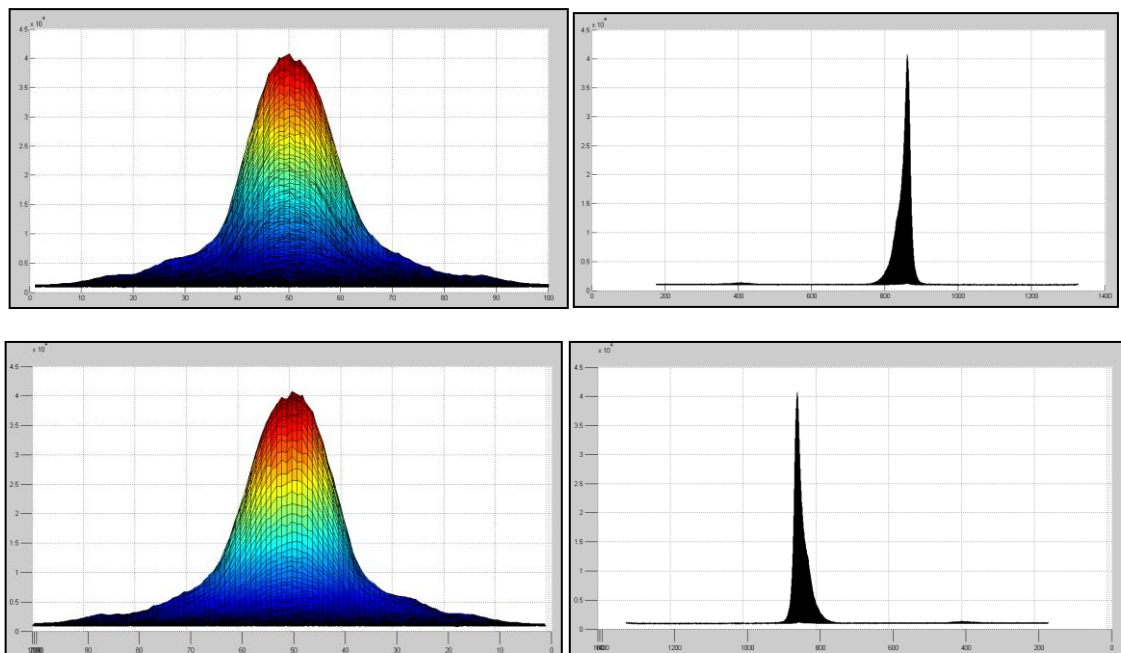


Figura 120



La instalación de un sensor de posición en el motor paso a paso evitaría la calibración, pudiéndose autocalibrar en cada medida sin necesidad de hacerlo expresamente.

El estudio de la luminosidad a través de un luxómetro ayudaría a establecer el rendimiento de los diodos y llevar a cabo un análisis de su consumo frente al flujo luminoso generado. Del mismo modo el decaimiento de esta luminosidad sometiendo los LEDs a estrés y su longevidad bajo estas circunstancias

Con esto se caracterizarían los diodos por completo definiendo por tanto su longitud de onda de trabajo, flujo luminoso generado, longevidad, rendimiento y diagrama de emisión, pudiendo sacar conclusiones concluyentes sobre cómo afecta cada uno de los parámetros al resto.

La fibra óptica utilizada como canal de transporte de la luz es otra de las características importantes, por lo que un estudio de la misma podría ofrecer detalles de cómo esta afecta a la distintas medidas.



BIBLIOGRAFIA

- [1] E. Fred Schubert. "Light-Emitting Diodes". 2nd Edition. Cambridge University Press. 2003
- [2] Semiconductores Universidad de Valencia. www.uv.es/electfis/ef/Propsc.pdf
- [3] Gráficas del desarrollo histórico y eficiencia de los diodos LED frente a la iluminación convencional www.omslighting.com/ledacademy/595/7-leds-strategy/72-lighting-efficiency-comparison
- [4] Tabla comparativa luminosidad entre diferentes fuentes <http://www.ledurbano.com/>
- [5] Homepage of E. Fred Schubert. "Light-Emitting Diodes". www.ecse.rpi.edu/~schubert/
- [6] Samsung webpage. <http://ledtv.es/sobre-led/sobre-led/por-que-tecnologia-led-en-television>
- [7] Eugene Hecht. "Óptica". Tercera edición. Pearson. 2000
- [8] Espectro ultravioleta <https://en.wikipedia.org/wiki/Ultraviolet>
- [9] Alumbrado LED en vehículos www.hella.com
- [10] Alumbrado publico www.iluminika.com/
- [11] Primer LASER rubí www.laserfest.org/lasers/how/ruby.cfm
- [12] Mohammad Adahed. "Fiber Optics Engineering". Springer. 2009
- [13] Pagina web Arduino www.arduino.cc/
- [14] ArduinoIO Package www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/32374-matlab-support-package-for-arduino-aka-arduinoio-package/content/examples/example_mot.m
- [15] Adafruit shield www.ladyada.net/make/mshield/solder.html
- [16] Diodo LED espectro visible. www.seoulsemicon.com/en/html/main/
- [17] Diodo LED IR www.osram-os.com/osram_os/en/